



Carlos Miguel Macário Figueiredo **Visões prática e de investigação no âmbito da construção metálica**



**Carlos Miguel Macário
Figueiredo**

**Visões prática e de investigação no âmbito da
construção metálica**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizado sob a orientação científica do Professor Doutor Nuno Filipe Ferreira Soares Borges Lopes, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e coorientação científica do Professor Doutor Paulo Jorge de Melo Matias Faria de Vila Real, Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

o júri

presidente

Prof^a. Doutora Maria Fernanda da Silva Rodrigues
Professora Auxiliar no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Joaquim Alexandre Mendes de Pinho da Cruz
Professor Auxiliar no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro (arguente)

Prof. Doutor Nuno Filipe Ferreira Soares Borges Lopes
Professor Auxiliar no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro (orientador)

agradecimentos

A realização deste trabalho não seria possível sem o contributo de pessoas que, direta ou indiretamente, ajudaram a que fosse possível finalizar esta etapa tão importante da minha vida:

Ao Prof. Nuno Lopes, meu orientador, o meu agradecimento pela transmissão de conhecimento, pela orientação próxima e rigorosa, e pela disponibilidade que ofereceu a este trabalho. Foi um enorme prazer trabalhar consigo.

Ao Prof. Paulo Vila Real, agradeço o seu comentário preciso e frontal, assim como o tempo empregue na supervisão deste trabalho.

Agradeço à Martifer, a oportunidade de estagiar na empresa com todos os recursos e condições oferecidos, o que possibilitou e potencializou a minha formação profissional e pessoal.

A todos os colegas de trabalho, em especial à minha equipa, o meu agradecimento pela forma como me acolheram, pela paciência que tiveram e pela ajuda constante permitindo assim a ultrapassagem de todos os desafios.

Aos meus colegas de curso, em especial ao Diego, Ranieri, Correia, Daniela, Anastasiya e Marta, pelos momentos partilhados durante estes anos e por contribuírem para a conclusão deste capítulo.

Aos meus amigos, pelo apoio e amizade. Por estarem sempre comigo durante a minha vida e, certamente, no resto dela.

Um agradecimento especial a toda a minha família. Pelo orgulho que têm em mim, pelo apoio e pelo suporte que me dão em todos os momentos da minha vida, o meu muito obrigado. Adoro-vos a todos!

À Sandra, minha namorada e companheira, pelo conforto, confiança, e motivação transmitida ao longo deste percurso. Pela importância que tem na minha vida e pelo seu amor, que todos os dias fazem de mim uma pessoa melhor. Pela pessoa maravilhosa que é, e pela qual me apaixonei, agradeço estes anos ao teu lado e os próximos que virão. Amo-te!

Por último, aos meus pais. Não só por todo o apoio e sustento durante esta etapa, mas principalmente por toda a minha vida serem o exemplo de esforço, dedicação e amor incondicional. Pelos valores que me transmitiram e por sempre me darem tudo o que precisei. Agradeço do fundo do coração tudo que fazem por mim. Amo-vos!

palavras-chave

Alumínio, Fachada, Preparação de obra, Mockup, Material de proteção, Análise térmica, Eurocódigo 3, Ábacos, Métodos simplificados

resumo

Inserido no âmbito da construção metálica, este trabalho abrange componentes prática e de investigação demonstradas, respetivamente, na realização de um estágio curricular de cinco meses na empresa Martifer S.A. e num estudo complementar correspondente à realização de uma comparação de três metodologias de análise térmica de secções transversais em I de aço protegidas ao fogo.

O estágio curricular consistiu na participação em um projeto de fachada modular em alumínio de uma obra de grandes dimensões, focado na preparação de fabrico. O trabalho desenvolvido implicou a aquisição de competências específicas do processo de fabrico de uma fachada de alumínio, conceitos teóricos adjacentes e a utilização de ferramentas informáticas específicas.

O estudo académico, paralelo ao estágio, consistiu na comparação de três metodologias de análise térmica a perfis em I metálicos protegidos ao fogo, com aplicação do material de proteção em contorno do perfil e em caixão. São comparados os resultados obtidos por ábacos disponíveis para projeto, que foram desenvolvidos com base na formulação simplificada do Eurocódigo 3, com os obtidos através da aplicação direta da mesma formulação (aplicando o programa Elefir-EN), e com os resultados obtidos dos elementos finitos (aplicando o programa SAFIR).

keywords

Aluminium, Facade, Work preparation, Mock-up, Protection Material, Thermal Analysis, Eurocode 3, Abacus, Simplified methods

abstract

Included in the scope of metallic construction, this work covers practical and research components demonstrated, respectively, in the accomplishment of a five-month traineeship in the company Martifer SA and in a complementary study corresponding to the accomplishment of a comparison of three methodologies of thermal analysis of sections steel I cross-sections protected to fire.

The curricular traineeship consisted of participating in a large modular aluminium facade project focused on manufacturing preparation. The work involved the acquisition of specific competences of the manufacturing process of an aluminium façade, adjacent theoretical concepts and the use of specific computer tools.

The academic study, parallel to the traineeship, consisted in the comparison of three methodologies of thermal analysis to steel I profiles protected to fire, with application of the material of protection in contour of the profile and in box. The results obtained by the abacus available for design, which were developed based on the simplified formulation of Eurocode 3, are compared with those obtained through the direct application of the same formulation (applying the program Elefir-EN), and with the results obtained from finite elements (applying the SAFIR program).

Índice Geral

1.	Introdução	3
1.1.	Considerações gerais	3
1.2.	Objetivos.....	3
1.3.	Estrutura da Dissertação	4
2.	Preparação de Fachada Modular.....	9
2.1.	Considerações gerais	9
2.2.	Enquadramento dos diferentes sistemas de alumínios	11
2.2.1.	Materiais	11
2.2.1.1.	Alumínio.....	11
2.2.1.2.	Aço	13
2.2.1.3.	Vidro	14
2.2.2.	Tratamentos de superfícies	18
2.2.2.1.	Lacagem.....	18
2.2.2.2.	Anodização	19
2.2.2.3.	Pintura	22
2.2.2.4.	Galvanização	22
2.2.3.	Processos de conformação.....	23
2.2.3.1.	Laminagem	23
2.2.3.2.	Extrusão	24
2.2.4.	Caixilharia	26
2.2.4.1.	Desempenho térmico.....	26
2.2.4.2.	Estanquidade à água	28
2.3.	Identificação de tipologias de fachadas em alumínio	29
2.3.1.	Fachada Ventilada	29
2.3.2.	Fachada Cortina.....	31
2.3.2.1.	Fachada Tradicional	34
2.3.2.2.	Fachada Trama horizontal ou Vertical	34
2.3.2.3.	Fachada Modular	35
2.3.2.4.	Fachada VEC.....	36
2.3.2.5.	Fachada VEB.....	37

2.3.2.6.	<i>Fachada Aufsat</i>	37
2.4.	Trabalho desenvolvido	38
2.4.1.	Ferramentas informáticas	38
2.4.2.	Desenhos de aprovação	39
2.4.3.	Planos de fabrico	41
2.4.4.	Dossier de montagem	42
2.5.	Acompanhamento de obra realizado	43
2.5.1.	Visual Mockup (VMU)	43
2.5.2.	Performance Mockup (PMU)	45
2.5.3.	Fabrico de módulos	46
2.6.	Considerações finais	47
3.	Análise térmica de perfis metálicos protegidos.....	51
3.1.	Considerações gerais	51
3.2.	Materiais de proteção passiva ao fogo.....	51
3.2.1.	Betão.....	52
3.2.2.	Tintas intumescentes	52
3.2.3.	Argamassa projetada.....	54
3.2.4.	Fibras minerais	55
3.2.5.	Placas de gesso	56
3.2.6.	Considerações finais	57
3.3.	Propriedades térmicas do aço	59
3.3.1.	Calor específico	59
3.3.2.	Condutividade térmica.....	60
3.4.	Curvas de incêndio utilizadas	61
3.4.1.	Curva de incêndio padrão ISO 834.....	61
3.4.2.	Curva de aquecimento lento	62
3.5.	Análises comparativas	63
3.5.1.	Análise simplificada (Ábacos).....	63
3.5.2.	Análise simplificada (Elefir-EN).....	65
3.5.3.	Análise numérica (SAFIR)	66
3.6.	Discussão de resultados	68
3.6.1.	Ábacos vs. Elefir-EN.....	69

3.6.2. Elefir-EN vs. SAFIR	74
3.7. Conclusões.....	83
4. Considerações finais.....	87
4.1. Conclusões.....	87
4.2. Futuros desenvolvimentos	88
Referências bibliográficas	93

Índice de Figuras

Figura 1 – Complexo industrial em Oliveira de Frades, Viseu.	9
Figura 2 – Edifício West End Gate, Londres, UK.....	10
Figura 3 – Identificação dos calços utilizados na montagem de vidros (WikiMartifer, 2018b).	17
Figura 4 – Aplicação de tinta em pó com recurso a pistola de ar comprimido(WikiMartifer, 2018b).....	18
Figura 5 – Perfis lacados em processo de secagem (WikiMartifer, 2018b).....	19
Figura 6 – Secção de uma superfície anodizada (WikiMartifer, 2018b).....	21
Figura 7 – Processo de laminagem a quente (WikiEngenharia, 2018).....	24
Figura 8 – Processo de extrusão direta (WikiMartifer, 2018b).	25
Figura 9 – Extrusão indireta (WikiMartifer, 2018b).	25
Figura 10 – a) Perfil de corte-térmico; b) composição de um perfil de corte térmico(Caixifacil, 2017; Caixiterm, 2018).	27
Figura 11 – Penetração da chuva numa fachada (WikiMartifer, 2018a).....	28
Figura 12 – Composição de uma fachada ventilada (Construlink, 2006).	29
Figura 13 – Câmara de ar em movimento – “Efeito chaminé” (WikiMartifer, 2018c).....	30
Figura 14 – a) Fixação visível; b) Fixação oculta (WikiMartifer, 2018c).....	31
Figura 15 – a) Fachada cortina contínua; b) Fachada cortina interrompida (WikiMartifer, 2018c).	33
Figura 16 – Sistema de fachada tradicional (WikiMartifer, 2018c).	34
Figura 17 – a) Fachada de trama horizontal; b) Fachada de trama vertical (Risca, 2012). .	35
Figura 18 – a) Ilustração de fachada modular; b) Montagem de fachada modular (WikiMartifer, 2018c).	36

Figura 19 – Exemplo de fachada VEC (Navarra, 2018).....	37
Figura 20 – Modelo de fachada VEB (WikiMartifer, 2018c).	37
Figura 21 – Exemplo de fachada Aufsatz alumínio/madeira (WikiMartifer, 2018c).	38
Figura 22 – Desenho de aprovação 1: Alçados PMU (Cortesia: Martifer)	40
Figura 23 – Desenho de aprovação 2: Plantas PMU (Cortesia: Martifer).....	40
Figura 24 – Desenho de aprovação 3: Alçados PMU (Cortesia: Martifer).	41
Figura 25 – Plano de fabrico de peça de suporte do GRC (Cortesia: Martifer).	42
Figura 26 – Desenho de montagem: GRC (Cortesia: Martifer).	43
Figura 27 – Visual Mockup (Cortesia: Martifer)	44
Figura 28 – Performance Mockup (Cortesia: Martifer).....	45
Figura 29 – Alçado de um dos painéis do piso 2 (Cortesia: Martifer).	46
Figura 30 – Módulos finalizados (Cortesia: Martifer).....	47
Figura 31 – Camada protetora envolvendo o perfil (SteelConstruction.info, 2014).	53
Figura 32 – Aplicação de argamassa projetada (Vila Real, 2016).	54
Figura 33 – Vermiculite aplicada em perfil metálico (Knight, 2017).	55
Figura 34 – Proteção em placas: a) lã de rocha; b) lã de vidro. (Isover, 2017; Termolan, 2016)	56
Figura 35 – Proteção ao fogo através de placas de gesso (Pannoni, 2017).	57
Figura 36 – Calos específico do aço (CEN, 2010b).	60
Figura 37 – Condutividade térmica do aço (CEN, 2010b).	61
Figura 38 – Curvas de aquecimento consideradas nas análises (CEN, 2010a, 2010c).	62
Figura 39 – Programa Elefir-EN.	65
Figura 40 – Programa GID.	66
Figura 41 – Site do programa SAFIR.	67
Figura 42 – Condutividade térmica do intumescente “E3” (Mesquita et al., 2005).....	68

Figura 43 – Análise comparativa “Ábacos vs. Elefir-EN” – IPE 300.....	71
Figura 44 – Análise comparativa “Ábacos vs. Elefir-EN” – IPE 500.....	72
Figura 45 – Exemplo de modelo realizado no programa SAFIR: a) proteção em contorno; b) em caixão.....	74
Figura 46 – Vermiculite e cimento, curva ISO 834.....	75
Figura 47 – Fibra mineral, curva ISO 834.....	75
Figura 48 – Perlite, curva ISO 834.....	76
Figura 49 – Placas de gesso, curva ISO 834.....	76
Figura 50 – Lã mineral, curva ISO 834.....	77
Figura 51 – Intumescente E3, curva ISO 834.....	77
Figura 52 – Intumescente E3, curva de aquecimento lento “CAL”.	78
Figura 53 – Vermiculite e cimento, curva ISO 834.....	78
Figura 54 – Fibra mineral, curva ISO 834.....	79
Figura 55 – Perlite, curva ISO 834.....	79
Figura 56 – Placas de gesso, curva ISO 834.....	80
Figura 57 – Lã mineral, curva ISO 834.....	80
Figura 58 – Intumescente E3, curva ISO 834.....	81
Figura 59 – Intumescente E3, curval de aquecimento lento “CAL”.	81

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Aplicações de produtos de alumínio (WikiMartifer, 2018b).....	12
Tabela 2 – Composição de uma fachada cortina (WikiMartifer, 2018c).	32
Tabela 3 – Propriedades térmicas de materiais de proteção passiva ao fogo (Vila Real, 2003).	58
Tabela 4 – Valores considerados para o material Vermiculite e Cimento.	69
Tabela 5 – Verificação se o material é leve ou pesado.....	70
Tabela 6 – Exemplo de iteração realizada para cálculo de espessura para material pesado.	70

Nomenclatura

$\frac{A_p}{V}$	Fator de massividade do perfil [m^{-1}]
λ_p	Condutividade térmica da proteção [$W/(mK)$]
d_p	Espessura de proteção [m]
c_p	Calor específico da proteção [$J/(kgK)$]
ρ_p	Peso volúmico do aço [kg/m^3]
c_a	Calor específico do aço [$J/(kgK)$]
ρ_a	Peso volúmico do aço [kg/m^3]
Δt	Intervalo de tempo [s]
$\theta_{a,t}$	Temperatura no aço no instante t [$^{\circ}C$]
$\theta_{g,t}$	Temperatura ambiente dos gases no instante t [$^{\circ}C$]
$\Delta\theta_{g,t}$	Aumento da temperatura ambiente dos gases durante o intervalo de tempo Δt [K]

Lista de Acrónimos e siglas

EC1	Eurocódigo 1
EC3	Eurocódigo 3
EN	Norma europeia
GRC	Glassfiber reinforced concrete
SFS	Steel framing system
IMS	Integrate menagement sistem
RFI	Request for information
SAFIR	Safety fire resistance

CAL Curva de aquecimento lento

Capítulo 1

Introdução

Introdução

1.1 Considerações gerais

1.2 Objetivos

1.3 Estrutura da Dissertação

1. INTRODUÇÃO

1.1.Considerações gerais

O presente trabalho tem como finalidade expor o trabalho desenvolvido no estágio curricular que se realizou durante, aproximadamente, cinco meses na empresa Martifer Alumínios, S.A. É apresentado no capítulo 2 o acompanhamento de uma obra de grandes dimensões em fase de projeto. O desenvolvimento deste trabalho foi inserido numa equipa composta por elementos de várias especialidades com competências e funções de direção de obra. São expostas todas as competências adquiridas no decorrer deste processo, assim como, as ferramentas auxiliares utilizadas. Serão também, abordados conceitos teóricos e técnicos importantes à conceção de sistemas de fachadas em alumínio, que constituem a base teórica de todo o trabalho realizado no estágio.

Paralelamente, e com o intuito de promover a inclusão neste trabalho de uma componente académica e de análise no âmbito da construção metálica, foi realizado um estudo complementar ao estágio onde se pretendeu efetuar uma análise térmica de perfis metálicos protegidos. Para tal, recorreu-se a três tipos de análise: 1) análise simplificada através de ábacos disponíveis para o efeito, 2) análise simplificada através do programa Elefir-EN, que aplica a formulação proposta no EC3 e 3) análise numérica, com recurso à modelação com o programa de elementos finitos SAFIR. A utilização de vários materiais como proteção, exigiu o conhecimento das propriedades térmicas de cada um, assim como a forma de proteção utilizada mais corrente e eficaz (em contorno e em caixão).

1.2.Objetivos

Inserido na unidade curricular tese/dissertação/estágio/projeto, o estágio curricular realizado na empresa Martifer Alumínios, S.A., teve como principal objetivo proporcionar uma primeira interação com o mundo empresarial assim como facilitar a aprendizagem de todas as dinâmicas de trabalho inerentes ao mesmo.

Em paralelo com o ponto anterior, o estágio pretendeu a aquisição de competências técnicas na área das estruturas metálicas relacionadas com o acompanhamento da obra em

fase de projeto, englobando todas as fases da mesma, em específico: orçamentação, projeto, preparação, execução e monitorização.

Assim, o desenvolvimento do estágio curricular compreendia os seguintes objetivos:

- Análise técnica e dimensionamento de fachadas de alumínio;
- Monitorização e otimização técnico-económica da obra;
- Elaboração de desenhos de fachadas de alumínio para aprovação do cliente;
- Preparação e modelação de planos de fabricação de fachadas em alumínio;
- Produção de representações digitais dos trabalhos através de equipamento de desenho assistido por computador;
- Revisão do orçamento comercial e elaboração do orçamento para produção;
- Execução da obra.

Relativamente ao estudo complementar realizado em paralelo com o estágio, este teve como objetivo realizar uma análise térmica de perfis metálicos revestidos com diferentes materiais de proteção passiva ao fogo.

A análise térmica propõe a comparação de três análises por métodos distintos, respetivamente, análise através de ábacos, análise simplificada e análise numérica. A comparação realizada teve como objetivos identificar as diferenças entre os três processos, analisar a eficácia de cada material de proteção e retirar conclusões importantes no esclarecimento do método de análise mais conclusivo e credível, procurando apontar os erros associados a cada um.

1.3.Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está dividida em quatro capítulos. Este primeiro capítulo pretende fornecer as considerações iniciais do trabalho desenvolvido e um enquadramento onde são expostos os objetivos e organização do documento.

No Capítulo 2 é apresentado todo o trabalho desenvolvido durante o estágio curricular. São apresentados conceitos de sistemas de alumínio relacionados com o trabalho que se realizou, assim como o acompanhamento de obra efetuado.

O Capítulo 3 é dedicado ao estudo complementar realizado. São abordados diferentes materiais de proteção passiva de perfis metálicos de secção “I” em aço ao fogo existentes, de forma a introduzir as análises térmicas realizadas. É feita uma descrição de cada tipo de análise e todas as considerações tomadas assim como os resultados obtidos.

No Capítulo 4 são apresentadas as considerações finais do trabalho e realizada uma reflexão sobre futuros desenvolvimentos do tema.

Capítulo 2

Preparação de fachada modular

Preparação de fachada modular

2.1 Considerações gerais

2.2 Enquadramento dos diferentes sistemas de alumínio

2.3 Identificação de tipologias de fachadas em alumínio

2.4 Trabalho desenvolvido

2.5 Acompanhamento de obra realizado

2.6 Considerações finais

2. PREPARAÇÃO DE FACHADA MODULAR

2.1.Considerações gerais

Neste capítulo, pretende-se expor os conceitos abordados e o trabalho realizado durante o período de estágio curricular, na empresa Martifer.

Fundada em 1990, a Martifer iniciou atividade no setor das estruturas metálicas, com sede em Oliveira de Frades. Sendo um grupo industrial com grande relevância e reconhecimento em todo o mundo, na área da construção metálica, a empresa está presente em várias geografias desde a Europa Ocidental, Europa de Leste, Médio Oriente e África.

Atualmente, a Martifer é uma referência no sector da construção metalomecânica, fachadas, em alumínio e em vidro, e indústria naval, procurando oferecer soluções inovadoras de engenharia em projetos de grande complexidade e dimensão, fazendo uso da sua presença internacional, experiência e grande capacidade industrial.



Figura 1 – Complexo industrial em Oliveira de Frades, Viseu.

Durante o período de estágio curricular, o trabalho desenvolvido abrangeu vários aspetos relacionados com os processos de gestão, coordenação, fabrico e aprovação de soluções da obra.

Desde a arranque dos trabalhos da obra, que uma serie de sectores comuns a todo o processo e dinâmica de funcionamento de um projeto trabalham em conjunto para que todas as etapas e metas estabelecidas sejam ultrapassadas de maneira eficiente e dentro dos prazos-limite estabelecidos.

O estágio curricular consistiu no acompanhamento de uma obra, mais precisamente a obra West End Gate, ilustrada na Figura 2, localizada em Londres, Reino Unido, e como cliente, a Berkeley Holmes.



Figura 2 – Edifício West End Gate, Londres, UK.

O projeto consiste no fabrico e montagem do envelope exterior do edifício, desde o piso 2 até à cobertura, envolvendo a instalação de 12 550 m² de fachada modular, dos quais 7 800 m² com revestimento em GRC (Glass Fiber Reinforced Concrete), 2 160 m² de caixilharia, 6 200 m² de revestimentos de chapas de alumínio lacadas para as varandas (paredes e tetos), 4 500 m² de SFS (Secondary Frame System), 3 145 m² de impermeabilizações e 223 m² de grelhas de alumínio para a cobertura.

O acompanhamento da obra durante o período de estágio englobou três fases, que serão abordadas nesta secção. O trabalho desenvolvido contemplou maioritariamente funções de preparação de fabrico, que consistiu num trabalho mais direccionado para a preparação das soluções aprovadas e a produção de módulos para obra e para os protótipos de aprovação e teste.

O trabalho realizado teve como base a elaboração de documentos e desenhos específicos das diversas áreas de intervenção da obra com apoio de ferramentas informáticas direccionadas para este tipo de trabalho.

A primeira secção deste capítulo surge como um enquadramento aos sistemas de alumínio existentes em que são introduzidos os materiais que os compõem, os tratamentos de superfície, os processos de conformação e as exigências funcionais de caixilharias.

Na segunda secção são abordadas todas as tipologias de fachadas existentes, expondo as características de cada uma, aplicação e vantagens e desvantagens.

Posteriormente na secção seguinte, são expostas as várias etapas que englobaram todo o processo de preparação e acompanhamento de obra.

Por último, é resumido e relatado, o trabalho desenvolvido na preparação de uma fachada modular assim como as ferramentas utilizadas.

2.2.Enquadramento dos diferentes sistemas de alumínios

O trabalho realizado durante o período do estágio curricular consistiu na preparação de uma fachada modular em alumínio de uma obra localizada em Londres.

De seguida, nos pontos que englobam este subcapítulo, são apresentados vários conceitos relacionados com os sistemas de alumínios, para uma melhor compreensão dos processos de preparação, conceitos técnicos e todos os assuntos relacionados com o fabrico de uma fachada de alumínio.

2.2.1. Materiais

2.2.1.1.Alumínio

O alumínio caracteriza-se por ser um material leve, dúctil, resistente e extremamente versátil, permitindo assim uma grande amplitude de aplicações. Estas características enumeradas explicam a procura e utilização deste material na construção civil, o que justifica o segundo lugar na categoria dos metais mais utilizados em todo o mundo, sendo que em primeiro lugar se encontra o ferro.

Além de uma combinação única de propriedades, tais como o baixo peso, elevada resistência, permeabilidade superior, fácil maquinagem, excelente resistência à corrosão e boa condutividade térmica e elétrica, o alumínio possui também um processo de reciclagem bastante fácil e infinitamente repetível, sem sofrer qualquer perda das propriedades físico-químicas e tornando este material bastante sustentável.

Uma das grandes vantagens da utilização de alumínio está relacionada com a sua versatilidade de fabricação sob a forma de diversos produtos e diversas maneiras, entre as

quais, o alumínio pode ser fundido, laminado até espessuras extremamente pequenas (mais finas que uma folha de papel), extrudido numa infinidade de perfis e forjado. As chapas de alumínio podem ainda ser estampadas, quinadas, estiradas e dobradas. Praticamente todos os processos de ligação são utilizados na montagem de peças ou estruturas de alumínio, respetivamente, a rebitagem, soldadura, brasagem e colagem.

O alumínio possui variadas aplicações que são utilizadas na indústria de acordo com as propriedades de cada uma e descritas na Tabela 1.

Tabela 1 – Aplicações de produtos de alumínio (WikiMartifer, 2018b).

Produtos	Aplicações
Perfis extrudidos	Aplicados em fachadas de edifícios, portas e janelas, divisórias, acessórios para casa de banho, estruturas pré-fabricadas e elementos decorativos de acabamento. Aproximadamente 60% dos perfis extrudidos são destinados à construção civil.
Chapas e laminados	Geralmente, utilizados em latas de alumínio, pisos e carroçarias de automóveis, coberturas e fachadas.
Folhas	Produzidas em várias espessuras, são utilizadas em diversos tipos de embalagens rígidas, flexíveis e descartáveis.
Fios e cabos	São utilizados em linhas de transmissão de energia, cabos isolados, para uso em rede de alta tensão, linhas de transmissão secundária ou comerciais.
Fundidos e forjados	A maior parte encontra diversas aplicações na indústria de transporte, tais como, carcaça de motores, rodas para automóveis, entre outros.

Em virtude dos acabamentos mecânicos, tais como polimento, jateamento com areia ou escovamento, a maioria dos produtos em alumínio dispensa a aplicação de revestimentos de proteção. Em casos que seja necessário outro tipo de acabamento que não a superfície pura do alumínio ou proteção adicional, a possibilidade de recorrer a tratamentos químicos, eletroquímicos ou pintura, ajuda a obter o acabamento ou proteção desejados. A anodização e a lacagem são, normalmente, os mais utilizados (WikiMartifer, 2018b).

2.2.1.2.Aço

O aço é uma liga metálica constituída essencialmente por ferro, entre 0,008% e aproximadamente 2,11% de carbono e, devido ao processo de fabricação, alguns elementos secundários, como silício, manganês, fósforo e enxofre. O ferro fundido, que também é uma liga metálica constituída por ferro e carbono, distingue-se do aço pelo teor de carbono que apresenta, normalmente entre 2,11% e 6,67%. O aço, devido à sua ductilidade, é facilmente deformável por forja, laminação e extrusão.

O aço pode ser produzido em alto forno ou em forno de arco elétrico (mini siderurgias), sendo este último o processo mais comum Portugal.

Nas grandes siderurgias, o aço é produzido a partir de uma mistura de minério de ferro, coque e cal, designada de *sinter*. Depois de carregadas as matérias primas no forno, o primeiro passo passa pela oxidação dos elementos, envolvendo a injeção controlada de oxigénio. O coque, em contacto com o oxigénio, produz calor que funde a carga metálica e dá início ao processo de redução do minério de ferro, transformando-o num metal líquido designado por *gusa*, uma liga de ferro e carbono, com um teor de carbono elevado, entre 1,7% e 6,67%. O próximo passo, depois da saída do forno, consiste na afinação da *gusa* por oxidação dos elementos indesejáveis (essencialmente carbono, enxofre, chumbo, manganês e silício) através da reação com o oxigénio, até atingir as percentagens pretendidas. Desta etapa obtém-se aço bruto líquido com teor de carbono entre 0,03% e 1,2%. Por último, o aço líquido é vazado, segundo um processo de vazamento contínuo, para moldes de arrefecimento, solidificando na forma de tarugos cortados em tamanhos adequados para a laminagem.

No caso dos fornos de arco elétrico, a matéria prima utilizada na produção de aço consiste em sucata, gusa, coque e cal. A sucata e a gusa são fundidas durante cerca de uma hora e seguem para a afinação, onde parte do carbono contido na gusa é removido juntamente com impurezas. Consoante as propriedades desejadas, o aço passa por um processo de afinação secundária, realizada num forno panela, para que seja regulada a sua composição química e a temperatura. Desta etapa, resulta aço bruto líquido, que é vazado para a panela de vazamento continuo passando para moldes de arrefecimento, solidificando e dando origem a lingotes. Estes lingotes são depois laminados em forma de chapas, fios, varões, etc (WikiMartifer, 2018b).

2.2.1.3. Vidro

O vidro é um material obtido através do arrefecimento de uma massa líquida à base de sílica. As suas principais características são a transparência e a dureza. O facto de ser um ótimo isolante, não ser poroso nem absorvente, possuir uma baixa condutividade térmica, um baixo índice de dilatação e suportar pressões até 10 800 kg/cm² faz com que este se distinga dos restantes materiais. A composição dos vidros mais utilizados na construção é composta por:

- Um vitrificante, a sílica SiO₂, introduzida na forma de areia, 70-72%;
- Um fundente, a soda, Na₂O, na forma de carbonato e sulfato (±14%);
- Um estabilizante, a cal, na forma de calcário (±10%);
- Outros óxidos, como por exemplo a alumina ou magnésio, que melhoram as propriedades físicas do vidro, particularmente a resistência aos efeitos atmosféricos.

Atualmente existem vários tipos de vidros que utilizados na construção civil e que tendem a oferecer características específicas para o tipo de obra ou funcionalidades pretendidas. Entre estes, destacam-se os seguintes:

- **Vidro float**

Este vidro é fabricado através de um processo “float”, introduzido e patenteado pelos irmãos Pilkington, em 1959. Este processo consiste em fazer a chapa de vidro em fusão flutuar à saída do forno, sobre um banho de estanho líquido até que esta esteja completamente plana e sem defeitos. Este tipo de produção de vidro é utilizado em mais de 90% dos vidros planos no mundo.

Os produtos onde é utilizado este tipo de vidro variam desde a aplicação destes em vidros laminados de segurança, vidros refletivos de controlo solar, espelhos, vidros duplos, vidros serigrafados até vidros temperados. O interior dos vidros existe uma câmara de ar composta por gás ou ar desidratado que assegura o desempenho térmico do vidro.

- **Vidro Duplo**

Este tipo de vidro é composto por duas ou mais chapas de vidros laminados temperados, coloridos, incolores, refletores ou de baixa emissividade, com características funcionais termo-acústicas. A separação das duas folhas de vidro é efetuada com recurso a um perfil intercalar de alumínio ou de um material termoplástico, com um desidratante no interior, que desempenha a função de absorver a humidade do ar, evitando a formação de condensação.

Em comparação com o vidro simples, o vidro duplo apresenta uma maior resistência e proteção assim como, um baixo coeficiente de transmissão térmica. A sua utilização assume várias aplicações tanto a nível residencial como comercial, como por exemplo, em janelas, fachadas, portas, coberturas, entre outros.

- **Vidro temperado**

O vidro temperado termicamente é um vidro que foi submetido a um tratamento térmico com o objetivo de alterar a sua fragmentação em caso de rotura, em relação ao vidro base. Este tratamento consiste em aquecer o vidro até uma temperatura próxima de 600°C, seguido de um arrefecimento brusco, fazendo inserir sobre a sua superfície uma pressão controlada. Este procedimento provoca fortes tensões de compressão na superfície do vidro e de tração no interior, originando um aumento considerável da resistência. Em caso de

rotura, o vidro temperado fragmenta-se em pedaços de pequenas dimensões, minimizando o risco de ferimentos em pessoas, o que se torna uma mais valia para determinadas aplicações.

- **Vidro laminado**

O vidro laminado é constituído por duas ou mais folhas de vidro coladas entre si, em toda a superfície, por um intercalar, que pode ser formado por uma película de um material sintético, resina ou gel, que tem como função unir as folhas de vidro. Este tipo de vidro pretende melhorar o isolamento sonoro, a segurança contra incêndio e a segurança contra arma de fogo, arrombamento, etc.

O vidro laminado mais comum é constituído por um intercalar de PVB, um material muito resistente e flexível que dota o vidro com uma resistência acrescida de suportar grandes impactos.

- **Vidro termoendurecido**

O vidro termoendurecido é obtido através de um processo idêntico ao do vidro temperado, mas com a diferença de o arrefecimento ser mais lento, o que acrescenta ao vidro uma enorme resistência ao choque térmico.

- **Vidro curvo**

O vidro curvo é obtido aquecendo o vidro float até à sua temperatura de amolecimento e, posteriormente, através de moldes de aço curvos, moldando-o à forma curva pretendida. Este tipo de vidro é utilizado em aplicações interiores e exteriores, nomeadamente em divisórias, portas rotativas, balcões, entre outros.

- **Vidro colorido**

Este tipo de vidro é produzido pela introdução de óxidos metálicos na composição do vidro, os quais originam variadas cores, reduzindo assim a transmissão solar. Este tipo de vidro é possível obter em vidro simples ou duplo. Em algumas aplicações específicas, devido à grande absorção de energia solar, é necessário que o vidro seja sujeito a um tratamento térmico de têmpera de forma a evitar a quebra por choque térmico. A maioria das aplicações

de vidro colorido estão relacionadas com a vertente estética do edifício ou a performance de controlo solar.

O vidro durante a sua vida útil deve ser capaz de resistir a todos os esforços que é solicitado. Desde cargas provocadas pelo vento em vidros exteriores verticais ou à combinação de cargas geradas pelo vento, neve e peso próprio em vidros exteriores inclinados, os vidros devem ser dimensionados tendo em atenção a profundidade no interior do caixilho, os suportes e as margens a garantir.

A montagem em obra deve ser feita desde a entrada em estaleiro, o vidro nunca deve estar sujeito a qualquer tipo de sujidade ou detritos que algum dos trabalhos adjacentes à obra pode provocar. Determinados contactos como “vidro – vidro”, “vidro – alvenaria” e “vidro – material” devem ser evitados, sendo que para este tipo de situações são utilizados calços (Figura 3) de suporte ou apoio (C1) que transmitem o peso do vidro no caixilho, de distanciamento (C2) que permitem posicionar e manter corretamente o vidro no caixilho, laterais (C3), que asseguram a espessura da junta de estanquidade entre o vidro e o caixilho, assim como a distribuição sobre o caixilho das solicitações perpendiculares ao plano do vidro.

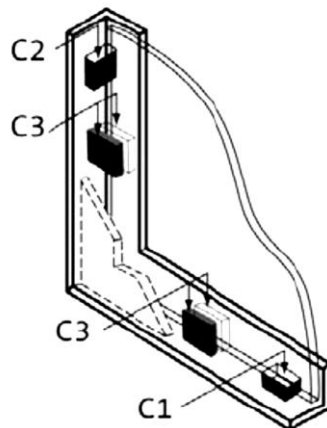


Figura 3 – Identificação dos calços utilizados na montagem de vidros (WikiMartifer, 2018b).

Os materiais utilizados no fabrico de calços são a madeira, chumbo ou borracha sintética (neoprene), sendo este último o mais indicado (WikiMartifer, 2018b).

2.2.2. Tratamentos de superfícies

Os tratamentos de superfície aplicados no alumínio têm como finalidade o melhoramento da resistência deste à degradação e corrosão, ou simplesmente para efeitos estéticos. Os tratamentos existentes são realizados através de processos químicos, eletroquímicos ou, simplesmente, pela aplicação de tintas.

Sendo uma matéria utilizada durante o estágio, seja na realização de desenhos de aprovação ou na elaboração de planos de fabrico, onde foi necessário conhecer o tipo de tratamento/acabamento do alumínio, a introdução deste tema neste trabalho torna-se assim necessária.

2.2.2.1. Lacagem

A lacagem é um processo de natureza electroestática, que protege a peça contra a corrosão e maximiza a adesão do poliéster.

Na preparação da superfície antes de receber o tratamento, a primeira etapa, banho de desgorduramento, é responsável pela remoção de resíduos, gorduras ou outras substâncias prejudiciais ao processo, que, normalmente, estão relacionadas com a extrusão. O procedimento seguinte é um banho de acetinagem, onde se pretende uma perda de massa aproximadamente de 1 g/m². O próximo passo é a cromatização, em que a finalidade é formar na superfície da peça uma camada amorfa de óxido de cromo ou fosfato de cromo, devido ao facto de ser poroso, aumenta a aderência da tinta ao alumínio. Por último, a peça é lavada e colocada numa estufa de secagem.



Figura 4 – Aplicação de tinta em pó com recurso a pistola de ar comprimido(WikiMartifer, 2018b).

Com a peça devidamente preparada, a lacagem é então realizada com a aplicação de tinta em pó com recurso a pistolas de ar comprimido, como ilustrado na Figura 4. O pó aglomerado com o ar comprimido encontra-se carregado eletricamente ao sair da pistola e a diferença de polaridade entre o pó e a superfície do material faz com que seja atraído para este último, cobrindo também as superfícies não diretas, como entalhes e partes posteriores. No passo seguinte, o pó é fundido a uma temperatura de 160 a 200 °C. Depois do arrefecimento, forma-se um revestimento resistente (Figura 5), uniforme e duradouro de boa aderência. Existem diversos acabamentos, tais como brilhante, acetinado, mate, texturado e granulado.

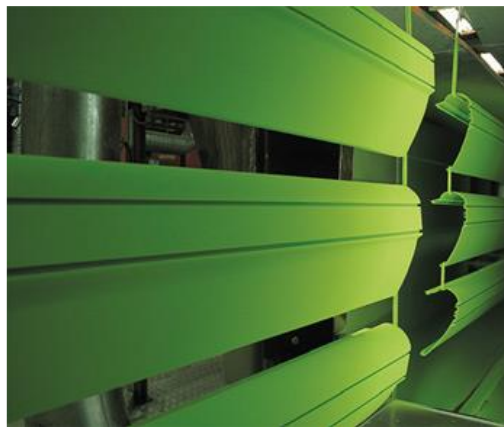


Figura 5 – Perfis lacados em processo de secagem (WikiMartifer, 2018b).

O alumínio lacado adquire elevada resistência ao impacto e à abrasão, boa deformabilidade (pode ser dobrado depois do tratamento) e é adequado para aplicações exteriores.

Comparada com as pinturas convencionais, a lacagem difere destas por não possuir solventes nos pós. A sua constituição resume-se a uma mistura de pigmentos, cargas, polímeros reativos endurecedores e aditivos (WikiMartifer, 2018b).

2.2.2.2. Anodização

O alumínio, em contacto com a atmosfera, forma uma camada fina de óxido na sua superfície que, durante a sua vida útil, vai estabilizando, tornando-o resistente à corrosão. Em situações pontuais, em que o alumínio possua uma finalidade arquitetónica e desta

forma, o aspeto e longevidade que este apresenta são fatores predominantes, a camada de óxido superficial formada impede o alumínio de cumprir o objetivo estético pretendido. Nestes casos, a anodização do alumínio surge como uma solução equilibrada, oferecendo uma grande diversidade de acabamentos em cor e textura, proteção contra a corrosividade, baixo custo de manutenção e aumento da longevidade do alumínio.

A anodização transforma a superfície do alumínio em óxido de alumínio, formando uma camada uniforme e solidamente ligada ao alumínio sendo que, a espessura desta, pode variar dependendo do propósito pretendido. Os subtratamentos, por norma, mais utilizados são o polido e o acetinado, em que um é o resultado de um tratamento mecânico e o outro o resultado de um tratamento químico, respetivamente (Extrusal, 2011; WikiMartifer, 2018b).

A anodização de perfis de alumínio é composta por quatro etapas: preparação da superfície, anodização, coloração e colmatação.

A preparação da superfície do alumínio é realizada com recurso a tratamentos mecânicos e/ou banhos químicos. Esta etapa é de extrema importância em todo o processo de anodização, pois permite remover toda a sujidade, óleos e óxidos do material. A primeira fase de preparação da superfície visa eliminar as camadas de óxidos presentes na superfície do alumínio para que, posteriormente, a deposição de material constitua uma camada aderente e homogénea, e consiste no desgorduramento da mesma, por imersão do material em banhos de soluções alcalinas, em conjunto com alguns aditivos, removendo assim os óleos e gorduras nestes depositados, e a decapagem, que consiste num forte ataque químico ao alumínio por imersão em soluções fortemente alcalinas, à base de hidróxido de sódio.

A anodização do alumínio é um processo eletroquímico que, em meio ácido, é provocada a corrosão controlada do alumínio originando o crescimento artificial e acelerado da película de óxido porosa que cobre naturalmente a sua superfície por decomposição da camada protetora. Esta capa, depois de formada, é extremamente dura e impenetrável pelos agentes atmosféricos e químicos. O processo de anodização mais usual na arquitetura resulta de banhos de ácido sulfúrico, devido à boa relação entre custo/performance. A porosidade e a espessura da capa anódica são fatores determinantes na definição das propriedades do alumínio anodizado que devem ser adequadas à agressividade do meio em que o material é aplicado. A Figura 6 ilustra a secção de um perfil de alumínio anodizado onde é possível observar a capa de óxido, porosa, formada pela anodização.

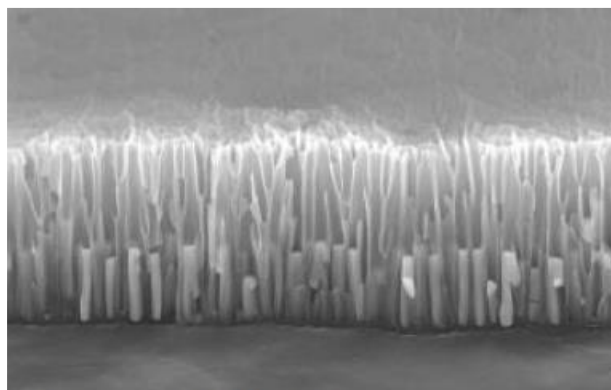


Figura 6 – Secção de uma superfície anodizada (WikiMartifer, 2018b).

A coloração é feita através da aplicação de substâncias corantes nos poros da capa formada. Com este procedimento é possível obter uma grande variedade de cores de grande estabilidade e resistência ao envelhecimento. De modo a alcançar esteticamente o efeito pretendido, têm sido desenvolvidos vários processos para a coloração do alumínio anodizado que permitam obter uma gama de cores cada vez mais abrangente. Atualmente, existem dois métodos distintos de coloração do alumínio. O primeiro, autocoloração ou coloração integral, ocorre durante a anodização num banho eletrólito à base de um ácido orgânico que produz diretamente uma camada anódica colorida. O segundo, coloração por imersão, que consiste na imersão do alumínio anodizado numa solução de corantes, sem aplicação de corrente elétrica, no qual os poros ficam impregnados com um pigmento que lhe confere a cor e o aspeto pretendido.

A última etapa do processo de anodização do alumínio é a colmatagem que consiste na eliminação da porosidade da camada anódica, maioritariamente através da imersão do alumínio em água próximo da temperatura de ebulição. Este procedimento confere à camada anodizada impermeabilidade e estabilidade face às condições ambientais adversas.

- **Anodização vs. Lacagem**

Comparando a anodização com a lacagem, esta última é utilizada quando se pretende cores mate ou brilhantes, como os brancos, os verdes ou os azuis. A lacagem possui ainda a vantagem de esconder ou disfarçar uma extrusão de fraca qualidade. É um tratamento mais simples e económico que a anodização.

A anodização é, à partida, um processo mais complexo. A formação da camada anódica e a posterior colmatagem do poro confere ao alumínio uma resistência superior. A utilização deste tratamento é por norma utilizada em obras de tons metalizados, com cores normalmente em bronze ou preto. As desvantagens deste processo prendem-se com os custos elevados inerentes devido à complexidade da aplicação (WikiMartifer, 2018b).

2.2.2.3.Pintura

A pintura é um acabamento superficial efetuado com tintas líquidas compostas por aglutinantes, pigmentos e aditivos necessários em solventes orgânicos. Nas aplicações arquitetónicas, a base do aglutinante é o poliuretano ou o fluoropolímero (PVDF), dependendo da aplicação final e dos requisitos. As tintas são aplicadas na superfície de alumínio, já preparada, através de pulverização com pistola. De seguida, atravessam um processo de secagem, no qual, não só se forma uma película com a saída do solvente mas também tem lugar uma reticulação térmica do polímero incrustando o pigmento na tinta reticulada. O método de aplicação, a quantidade das camadas de tinta, bem como as condições de secagem e de reticulação dependem em grande medida do aglutinante e, com isso, do perfil característico da superfície (WikiMartifer, 2018b).

2.2.2.4.Galvanização

A corrosão é responsável pela perda de 20% de ferro no mundo. Entre os processos de proteção já desenvolvidos, um dos mais antigos e bem-sucedidos é a zincagem ou galvanização por imersão a quente. Através deste processo, os materiais são protegidos mesmo sob as condições mais desfavoráveis, prolongando a vida útil do produto. Acresce ainda o facto de, no final do seu ciclo de vida, o produto poder ser reciclado em nova fusão, sem que se liberte ferrugem.

A galvanização por imersão a quente consiste no revestimento de peças de aço ou ferro fundido de qualquer tamanho, peso, forma e complexidade, com zinco, com o objetivo de aumentar a sua proteção contra a corrosão. O funcionamento deste tratamento implica o “sacrifício” do zinco de modo a proteger o material base. Como o zinco mais anódico, este é corroído primeiro, protegendo o material base do ambiente corrosivo.

A primeira etapa do processo de galvanização é a preparação da superfície que, após o habitual desengorduramento necessário para remover óleos e sujidade, é decapada, por norma, em ácido clorídrico ou sulfúrico. A decapagem serve para remover a ferrugem e os óxidos presentes na superfície do material base a revestir.

A galvanização ocorre, depois de preparada a superfície da peça a revestir, normalmente a temperaturas entre 445 e 455°C. A peça é mergulhada numa cuba com zinco fundido, onde se dá a reação do zinco com o metal, iniciando-se a formação de quatro camadas que dão origem ao revestimento protetor final. Esta proteção é composta por uma camada externa de zinco e várias camadas de liga Fe-Zn, quimicamente unidas ao material -base.

Com a peça ainda quente, segue-se um processo de passivação que consiste no rápido arrefecimento da mesma, em soluções à base de ácido crómico e bicromato, aumentando a dureza do revestimento de zinco. Este procedimento dá ao produto zincado um aspeto amarelado. Por último, é possível realizar dois acabamentos finais: por metalização – deposição de zinco por aspersão térmica – ou, com tinta de alto teor em zinco (maior que 90%).

As principais vantagens associadas a este tratamento de superfície são o baixo custo inicial e custo de manutenção, a longevidade do revestimento, a qualidade elevada do revestimento obtido e a resistência a danos elevada.

Contrariamente, as desvantagens predem-se com a restrição a aplicação a instalações permanentes, a cor ser possível de alterar apenas por pintura e as dimensões da peça serem limitadas ao banho de zinco (WikiMartifer, 2018b).

2.2.3. Processos de conformação

2.2.3.1. Laminagem

Os processos de conformação são utilizados na produção dos diferentes elementos de alumínio. A laminagem é um processo mecânico de redução da secção transversal de uma placa de alumínio por compressão de dois cilindros de aço que giram em sentido contrário. Este processo reduz a espessura da placa e em sentido inverso, o comprimento e largura da

mesma aumentam. Este procedimento é composto por duas etapas que podem ser realizadas individualmente ou sequencialmente: a laminagem a quente e a laminagem a frio.

Na laminagem a quente (Figura 7), fase inicial do processo, os lingotes, em forma de blocos, tarugos ou placas, são aquecidos e deformados plasticamente sob altas tensões e temperaturas (no caso do alumínio, entre 400 e 500°C), pela passagem de cilindros de laminagem lubrificados que, através de diversas passagens, originam uma redução da espessura de aproximadamente 50% por passagem.

A segunda e última etapa do processo, a laminagem a frio, é realizada também por compressão do material por cilindros de laminagem, desta vez à temperatura ambiente. Esta fase, confere ao produto final as características de resistência mecânica pretendidas e o acabamento superficial final (WikiMartifer, 2018b).

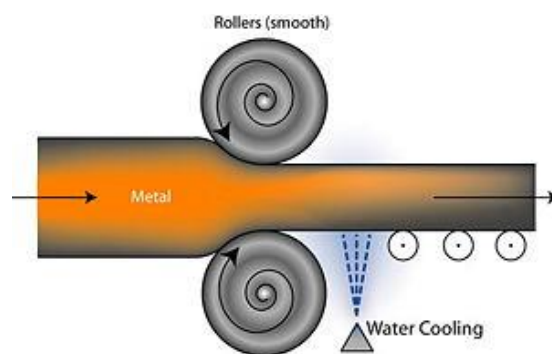


Figura 7 – Processo de laminagem a quente (WikiEngenharia, 2018).

2.2.3.2. Extrusão

O processo de extrusão é utilizado na transformação mecânica da secção transversal de um tarugo que, quando forçado a fluir através de um orifício de uma matriz sob elevadas pressões assume uma secção final específica. Este processo permite que sejam extrudidas inúmeras geometrias, com aplicação em diversas indústrias e com recurso a diversos materiais metálicos. A extrusão pode ser realizada a frio ou a quente, mas, à medida que o teor em carbono nos metais a extrudir aumenta, torna-se extremamente difícil realizar a extrusão a frio, sendo esta preterida pela extrusão a quente.

A extrusão de peças metálicas é um processo bastante usado para a produção de perfis de diversos materiais como os aços, alumínio e o cobre.

As ligas de alumínio geralmente usadas na extrusão de perfis para arquitetura são tratáveis termicamente, oferecem boa resistência à corrosão e apresentam uma boa relação entre resistência mecânica e ductilidade.

Os dois tipos de processos de extrusão mais comuns são a extrusão indireta ou inversa e a extrusão direta. Sendo a extrusão direta o processo mais utilizado na extrusão, esta consiste no material ser forçado, através da força de um pistão, a passar por uma matriz estática que, posteriormente, dá a forma ao perfil. Este processo, exemplificado na Figura 8, possibilita a conformação de peças de grande dimensão e complexidade geométrica, com elevado controlo dimensional.

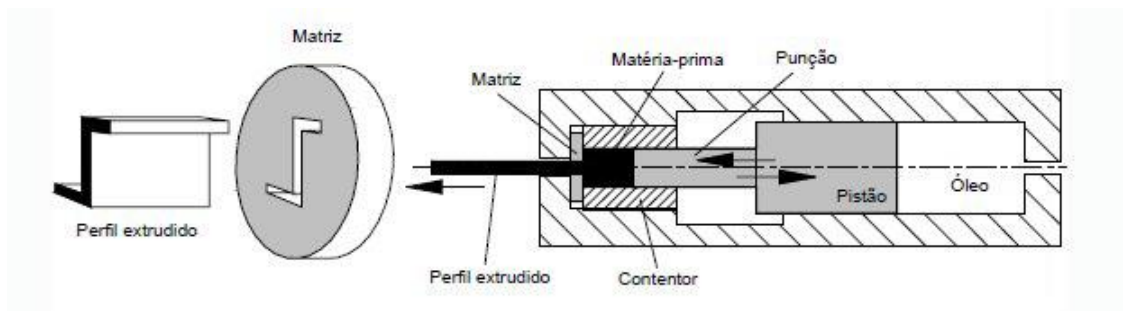


Figura 8 – Processo de extrusão direta (WikiMartifer, 2018b).

Na extrusão indireta (Figura 9), o material é forçado a passar por uma matriz, mas neste caso a matriz está montada no pistão e desloca-se na direção do tarugo estático, ou seja, o fluxo de material (e a saída da peça) faz-se na direção inversa da deslocação do pistão. A principal desvantagem da extrusão indireta consiste na maior complexidade e no custo acrescido das ferramentas.

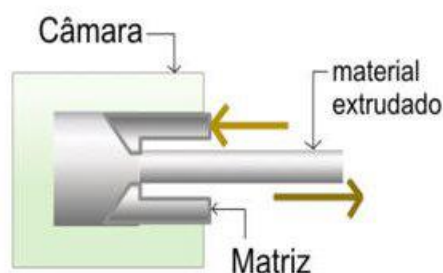


Figura 9 – Extrusão indireta (WikiMartifer, 2018b).

Uma das aplicações industriais mais importantes da tecnologia da extrusão que tem vindo a ser descrita, consiste no fabrico de perfis estruturais de alumínio por extrusão isotérmica a quente. A matéria-prima e a matriz são aquecidas a temperaturas próximas dos 450°C, com uma velocidade de atuação do pistão na gama dos 5 a 50 m/min. Os perfis, depois de extrudidos, podem possuir comprimentos entre os 25 e os 45 m, uma espessura mínima das paredes na ordem de grandeza do 1 mm e bons acabamentos superficiais (WikiMartifer, 2018b).

2.2.4. Caixilharia

A utilização de caixilhos de alumínio na construção tem vindo a aumentar pelas vantagens que apresentam, nomeadamente, um período de vida útil muito longo sem grandes necessidades de manutenção, uma relação entre a resistência e o peso muito elevada, minimizando as cargas introduzidas na estrutura do edifício e facilitando as operações de transporte, manuseio e montagem.

O alumínio possibilita uma grande flexibilidade de design, por um lado, porque o processo de extrusão, anteriormente referido, permite obter uma ampla gama de perfis com diferentes formatos, e, por outro, porque os tratamentos de superfície permitem obter um vasto conjunto de acabamentos diferentes, inclusivamente podem-se ter acabamentos diferentes no exterior e no interior da caixilharia.

A principal limitação à sua aplicação deve-se ao facto de o alumínio ser um bom condutor de calor, dificuldade que pode ser ultrapassada com a utilização de barreiras térmicas de materiais isolantes, permitindo assim a produção de caixilharias com elevado grau de isolamento térmico.

Devido às características únicas do alumínio, exigências de funcionais como o desempenho térmico, a estanquidade à água, a durabilidade e a manutenção assumem grande relevância.

2.2.4.1. Desempenho térmico

Sendo o alumínio (assim como todos os metais) um bom condutor de calor, é um fator negativo no que diz respeito à aplicação deste material em caixilharias.

De modo a melhorar o comportamento térmico das caixilharias de alumínio, são utilizados perfis com rutura de ponte térmico, conhecidos como perfis de corte-térmico, ilustrado na Figura 10 – a).

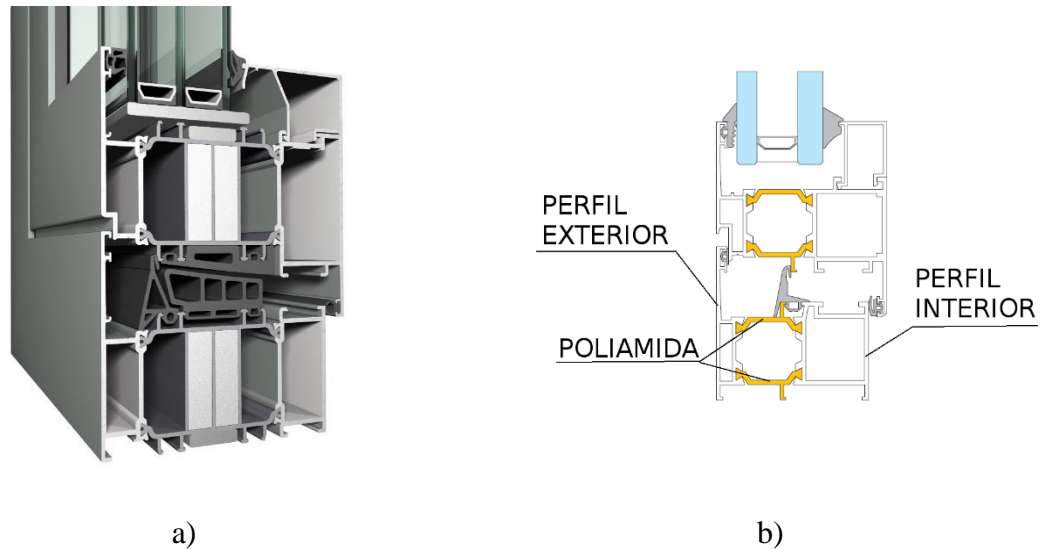


Figura 10 – a) Perfil de corte-térmico; b) composição de um perfil de corte térmico(Caixifacil, 2017; Caixitem, 2018).

Um perfil com rutura de ponte térmica é na realidade constituído por dois perfis independentes, um interior e um exterior, unidos por peças de poliamida, como é possível observar na Figura 10 – b), um material com baixa condutibilidade. Usualmente, na extrusão de perfis de corte térmico, é utilizado um polímero com base em poliamida 6.6 reforçada com fibras de vidro.

Esta solução permite aumentar o nível de conforto interior sendo que, a um maior isolamento térmico está associado um melhor isolamento acústico. Outra vantagem que deriva da aplicação de corte térmico nas caixilharias, é que ao diminuir a diferença de temperatura entre o interior e o caixilho, permite minimizar a condensação no interior e, consequentemente, otimizar os sistemas de controlo de temperatura, com os ganhos energéticos e financeiros associados (WikiMartifer, 2018a).

2.2.4.2. Estanquidade à água

A infiltração da água da chuva numa fachada dá-se por uma combinação de diversos fatores tais como, a energia cinética da chuva, a capilaridade, gravidade, pressão do vento ou correntes de ar.

O processo de penetração da chuva numa fachada, ilustrado na Figura 11, origina uma cortina de água que, ao encontrar a aresta de uma padieira, é soprada pela ação do vento contra a parte superior de uma janela. Após a incidência na janela, a água da chuva percorre toda a superfície dos perfis do caixilho e dos vidros.

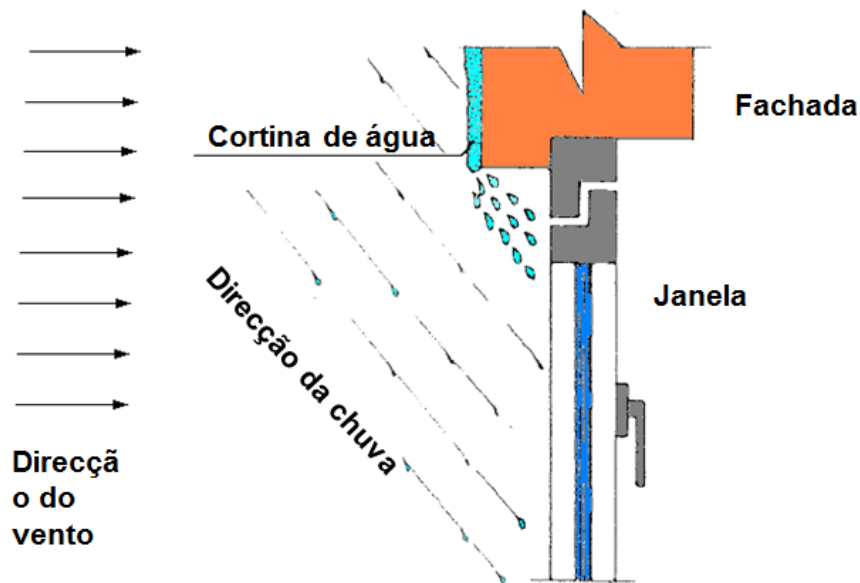


Figura 11 – Penetração da chuva numa fachada (WikiMartifer, 2018a).

De forma a garantir que a fachada cumpre com os requisitos de desempenho relacionados com a estanquidade à água, existem um conjunto de regras importantes a cumprir que asseguram a eficácia dos métodos de vedação em caixilhos de alumínio, destacando-se a aplicação de silicone em orifícios, cantos e uniões de perfis que possam ser origem de infiltrações e a execução de rasgos de drenagem que possibilitem o escoamento para o exterior do caixilho de qualquer água que possa ter penetrado no seu interior (WikiMartifer, 2018a).

2.3. Identificação de tipologias de fachadas em alumínio

Recentemente, devido a alguns desenvolvimentos tecnológicos, observou-se uma mudança de paradigma relativamente à função de separação entre exterior e interior que uma fachada representava. Atualmente, é pretendido que a fachada possua determinadas características que lhe permitam interagir com as condições climáticas extremas cumprindo as exigências de desempenho térmico, de ventilação e estanquidade assim como, obter o aspeto estético desejável aliado a bons parâmetros de manutenção e eficiência (WikiMartifer, 2018c).

De seguida apresentam-se as tipologias de fachadas existentes assim como a considerada durante o estágio.

2.3.1. Fachada Ventilada

Como referido anteriormente, a revolução tecnológica verificada na construção de fachadas com o aparecimento de novos materiais e de sistemas, construtivos e de sustentabilidade, levou ao aparecimento das fachadas ventiladas. Este sistema de fachadas, ilustrado na Figura 12, é composto por vários componentes e um conjunto de subestruturas de suporte e apoio à parede, uma lâmina de isolamento exterior à parede de suporte, uma caixa-de-ar ativa entre a lâmina e isolamento e o painel exterior e um painel exterior de revestimento. Em função da zona geográfica e das exigências funcionais exigidas, todos os componentes enumerados podem variar (Carvalho, 2008).

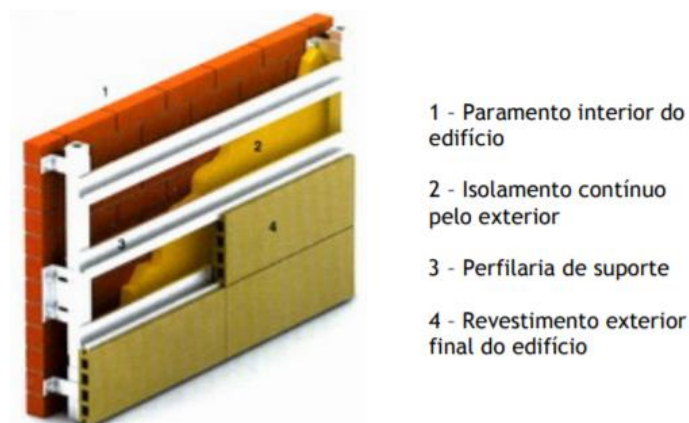


Figura 12 – Composição de uma fachada ventilada (Construlink, 2006).

Este sistema de fachada é caracterizado pelo afastamento entre a parede do edifício e o revestimento, criando assim uma câmara de ar em movimento, permitindo a ventilação normal e contínua da parede do edifício. Este movimento de ar é denominado de “efeito chaminé”, exemplificado na Figura 13 (WikiMartifer, 2018c).

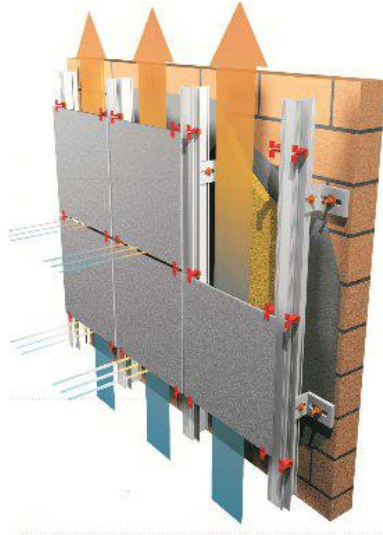


Figura 13 – Câmara de ar em movimento – “Efeito chaminé” (WikiMartifer, 2018c).

Entre as inúmeras vantagens que as fachadas ventiladas apresentam, destacam-se o excelente isolamento térmico, um bom isolamento acústico, elevadíssima impermeabilidade, longa durabilidade e acabamento estético de grande variedade. Paralelamente a estas valências, obtêm-se um baixo custo de manutenção.

A fixação deste sistema de fachada à parede de suporte exige que esta tenha uma resistência mecânica adequada de modo a suportar todas as cargas associadas à estrutura metálica e ao produto de revestimento aplicado nessa estrutura. A fixação pode ser feita através de fixações visíveis (Figura 14 – a) ou oculas (Figura 14 – b).

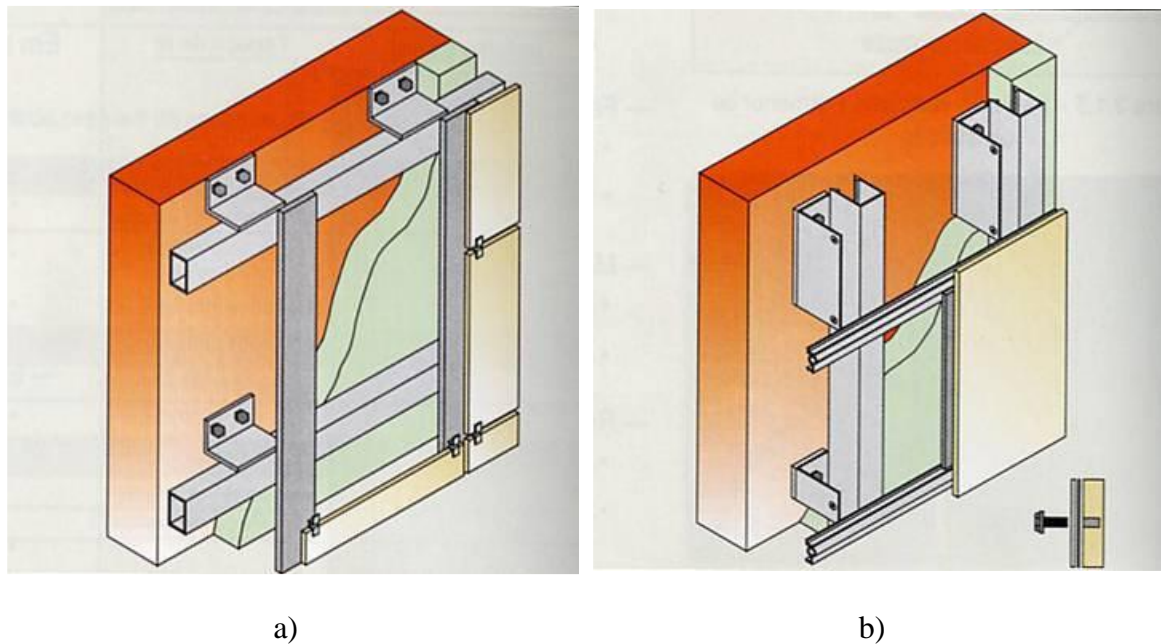


Figura 14 – a) Fixação visível; b) Fixação oculta (WikiMartifer, 2018c).

Em relação ao revestimento a aplicar, o mesmo pode ser constituído por diversos materiais, desde vidros altamente sofisticados, granito, pedra, cerâmica e painéis compósitos de metais, entre outros (WikiMartifer, 2018c).

2.3.2. Fachada Cortina

A fachada cortina é um sistema de alumínio e vidro direccionado para edifícios cuja arquitetura pretenda transparência e luminosidade natural, cumprindo de forma igual aos outros sistemas de fachada as características de desempenho.

A composição do sistema de fachada cortina engloba os elementos resistentes, elementos de enchimento, elementos praticáveis, elementos de fixação. A Tabela 2 explicita os elementos de cada grupo, a sua designação e função.

Tabela 2 – Composição de uma fachada cortina (WikiMartifer, 2018c).

Elementos	Composição	Designação/função
Resistentes	<ul style="list-style-type: none"> • Montantes 	Elementos verticais fixos com peças de amarração à estrutura do edifício. Suportam o seu peso próprio e as ações dos elementos que estão fixos a estes, assim como cargas do vento.
	<ul style="list-style-type: none"> • Travessas 	Elementos horizontais fixos aos montantes. Suportam as cargas dos elementos de enchimento que gravitam sobre eles.
Enchimento	<ul style="list-style-type: none"> • Vidro 	Permite a entrada de luz no edifício. Alguns tipos de vidros (translúcidos e colorido) podem ser colocados nas zonas opacas, ou “zonas cegas”, obtendo-se um aspeto de envidraçamento total.
	<ul style="list-style-type: none"> • Painéis opacos 	São colocados nas “zonas cegas”. Usualmente são compostos por painel sandwich ou chapa de alumínio.
Praticáveis	<ul style="list-style-type: none"> • Janelas 	Consistem nas janelas incorporadas para facilitar a ventilação e/ou a manutenção do edifício. Podem contribuir também para a segurança no caso de evacuação de fumos e acessos de emergência.
Fixação	<ul style="list-style-type: none"> • Peças de amarração 	Geralmente em aço, unem a fachada cortina à estrutura do edifício. Contêm elementos de regulação que corrigem a fixação nos três eixos.
	<ul style="list-style-type: none"> • União dos elementos da fachada entre si 	Utilizam-se para fixar as travessas aos montantes.

Dependendo do sistema construtivo, o aspeto da fachada e do sistema de montagem, a fachada cortina é classificada como contínua (Figura 15 – a), quando a fachada é suspensa

na frente da laje, ou interrompida (Figura 15 – b), quando a fachada se situa entre as lajes e se apoia nas mesmas.

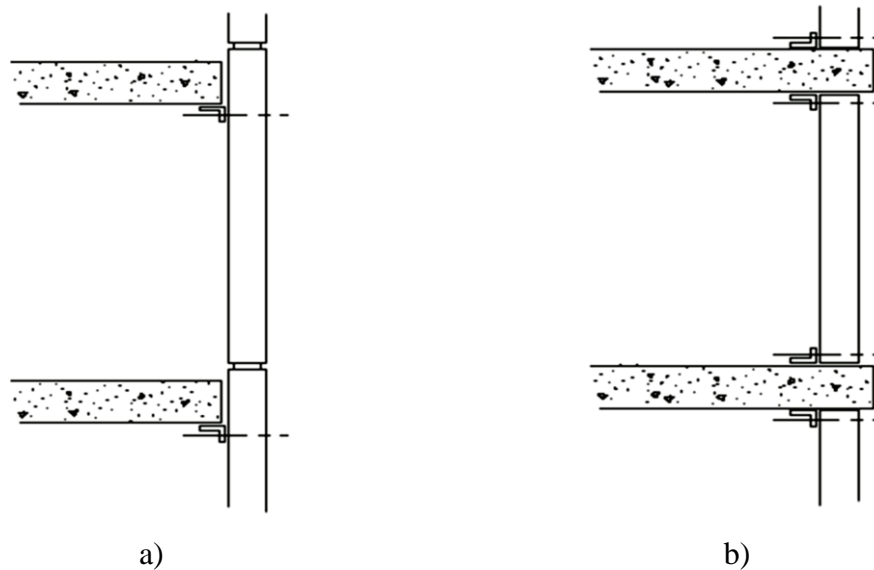


Figura 15 – a) Fachada cortina contínua; b) Fachada cortina interrompida (WikiMartifer, 2018c).

A montagem deste tipo de fachada assume três sistemas distintos: modular, tradicional ou semi-modular.

O primeiro caracteriza-se pela produção completa do módulo em fábrica, incluindo os elementos de enchimento. A altura do módulo é definida pela distância entre as lajes o que faz com que cada módulo possua fixação própria e seja, construtivamente, independente dos restantes.

O sistema tradicional consiste na produção em fábrica dos montantes e travessas com os acessórios e elementos de fixação. A montagem dos restantes perfis, vidros, painéis e janelas é efetuada em obra.

O sistema semi-modular surge como uma combinação dos dois sistemas anteriores.

A evolução dos sistemas construtivos e a incorporação de novos materiais, possibilitou a alteração do conceito de fachada cortina. Assim, quanto ao aspeto da fachada, existem diversas opções construtivas que serão abordadas de seguida (WikiMartifer, 2018c).

2.3.2.1. Fachada Tradicional

O sistema de fachada tradicional, representado na Figura 16, consiste na combinação de painéis de vidro com perfis de alumínio, onde é possível identificar visualmente as linhas verticais e horizontais bem definidas pelo exterior.

Neste tipo de fachada cortina, a colocação do vidro é realizada com recurso a uma contra-capa, denominada “capa de aperto”, que fixa o vidro dentro do caixilho. Por sua vez, a capa de aperto é protegida por uma capa exterior (capô), em que a sua união é feita através de clipagem. Nesta situação, tanto a capa exterior como o capô, são isoladas do vidro por um perfil isolante em EPDM, designado vedante exterior. O mesmo acontece no interior do caixilho, em que a estrutura interna se encontra separada do vidro através da colocação de vedantes interiores.

Além dos montantes e travessas que constituem a estrutura interna da fachada, canais de drenagem e ventilação fazem também parte da constituição da mesma, garantindo, juntamente com um sistema de juntas de EPDM, que os parâmetros de estanquidade e permeabilidade são cumpridos (WikiMartifer, 2018c).

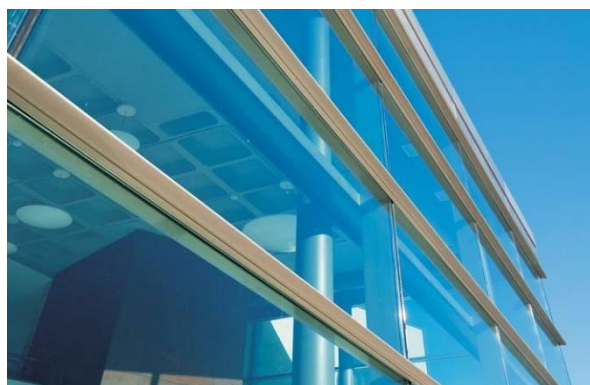


Figura 16 – Sistema de fachada tradicional (WikiMartifer, 2018c).

2.3.2.2. Fachada Trama horizontal ou Vertical

Este sistema de fachada consiste num processo misto de fixação de vidros, em que a aplicação dos capôs na fachada determina se esta é de trama horizontal ou vertical, pelo efeito linear estético que a mesma apresenta.

A fachada de trama horizontal caracteriza-se pela ausência de perfis exteriores na vertical (Figura 17 – a) e a fachada de trama vertical (Figura 17 – b) pela inexistência de capôs na horizontal. A fixação do vidro nos montantes e travessas na fachada de trama horizontal e vertical, respetivamente, é efetuada por colagem, protegida e rematada com um vedante em EPDM (WikiMartifer, 2018c).



a)



b)

Figura 17 – a) Fachada de trama horizontal; b) Fachada de trama vertical (Risca, 2012).

2.3.2.3. Fachada Modular

O sistema de fachada modular, caracteriza-se por ser um sistema formado por painéis modulares que contém todos os componentes necessários para o seu fabrico e montagem.

Neste tipo de fachada, os módulos, são produzidos na totalidade em fábrica, o que possibilita um controlo de qualidade extremamente rigoroso. As particularidades de cada módulo como entalhes e sistema de vedação, são introduzidos no momento do fabrico, o que possibilita uma maior facilidade de transporte e montagem em obra.

Pelos motivos acima referidos, além das vantagens do controlo da qualidade na produção, a instalação em obra deste tipo de sistema é fácil, em comparação com outros sistemas, e executada com bastante rapidez, com a possibilidade da utilização de gruas na colocação dos painéis quando não seja prático a utilização de andaimes.

A versatilidade deste tipo de fachada permite a incorporação de janelas e portas, assim como outros sistemas de fachada cortina, oferecendo uma solução de fachada para qualquer tipo de edifício (WikiMartifer, 2018c).

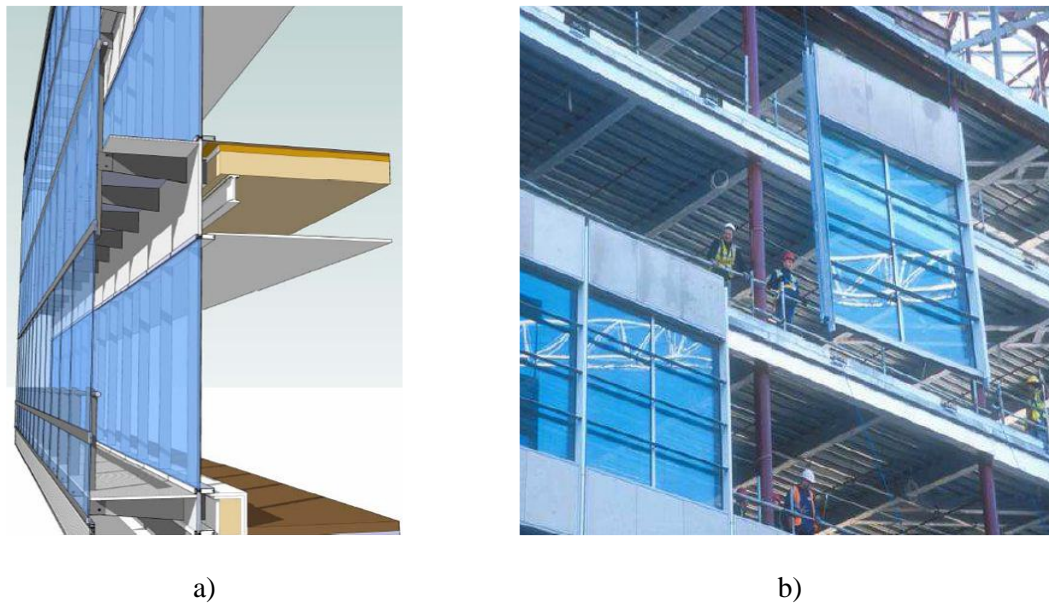


Figura 18 – a) Ilustração de fachada modular; b) Montagem de fachada modular (WikiMartifer, 2018c).

2.3.2.4. Fachada VEC

O sistema de fachada VEC (Vidro Exterior Colado) consiste num tipo de sistema que, substitui os perfis de alumínio exteriores, por um produto adesivo grande aderência (silicone estrutural) que fixa o vidro pelo interior diretamente aos montantes e travessas. Este sistema origina uma redução do peso do edifício, salvaguardando o efeito estético do mesmo com fachadas transparentes e o vidro como elemento principal.

De forma a garantir a proteção e segurança dos vidros são colocadas umas peças de suporte adicionais ao sistema de fixação. Neste sistema, o silicone estrutural é o responsável por transmitir para a estrutura de alumínio as cargas aplicadas na fachada, resultantes do efeito do vento, peso e tensões derivadas de dilatações entre o vidro e a caixilharia.

Por recorrer a um processo de colagem, a utilização de fachada VEC engloba alguns cuidados em todas as etapas de fabrico deste sistema assim como de manutenção durante a sua vida útil. Problemas de envelhecimento, limpeza da superfície e estanquidade são pontos fundamentais, que devem ser tratados e tidos em conta (WikiMartifer, 2018c).



Figura 19 – Exemplo de fachada VEC (Navarra, 2018).

2.3.2.5. Fachada VEB

O sistema VEB (Vidro Exterior com Bite), aproxima-se esteticamente do sistema VEC, com a diferença que neste caso é incorporado um bite que fixa o vidro à estrutura de alumínio. Apesar de neste tipo de fachada o vidro ser fixo mecanicamente, em alguns casos é possível recorrer a colagem com silicone estrutural (WikiMartifer, 2018c).



Figura 20 – Modelo de fachada VEB (WikiMartifer, 2018c).

2.3.2.6. Fachada Aufsatz

A fachada Aufsatz difere dos restantes sistemas de fachada pelo facto de os montantes e travessas não ser compostos por uma estrutura em alumínio. Por norma, a estrutura auxiliar que define os montantes e travessas é em aço ou madeira. Esta combinação de alumínio com aço/madeira, possibilita um leque de soluções únicas tanto a nível estético como a nível técnico (WikiMartifer, 2018c).



Figura 21 – Exemplo de fachada Aufsatz alumínio/madeira (WikiMartifer, 2018c).

2.4. Trabalho desenvolvido

A preparação de fabrico envolve várias funções e trabalhos que visam desenvolver as soluções aprovadas para aplicação em obra, solucionar problemas que possam ocorrer durante o processo e auxiliar a direção de obra na fase de execução.

Inerente a estas funções, existem trabalhos a serem realizados pela equipa responsável pela preparação da obra e, neste sentido, este subcapítulo expõe e contextualiza estes trabalhos executados e como estes se relacionam com todas as outras especialidades e departamentos paralelos ao projeto.

Foram realizados desenhos para aprovação, planos de fabrico e dossiês de montagem de estruturas a ser aplicadas em obra e/ou em mockup's. O trabalho realizado foi auxiliado pelas ferramentas informáticas elencadas.

2.4.1. Ferramentas informáticas

Hoje em dia, todos os projetos são realizados com recurso a ferramentas informáticas que simplificam e aceleram todo o processo de preparação e construção.

Em relação à preparação de fachada de alumínio, a maioria do trabalho é feito com base no programa de desenho AutoCAD. Este programa, integrante de qualquer empresa de engenharia e utilizado durante o estágio curricular, permitiu a criação PF's e desenhos de aprovação, organização de plantas e pormenores, e todas as outras particularidades da obra relacionadas com o desenho.

Outras ferramentas informáticas relacionadas com a preparação de obra, quer para a preparação de caixilharia quer para a fabricação de chapas, são o FPpro, PlanIQ e AlphaCAM, que são softwares que permitem uma criação de um modelo digital de modo a obter otimizações de materiais, cotas de aplicação de maquinagens, métodos construtivos e visualizações 3D que possibilitam uma melhor perceção do produto final, neste aspeto, também auxiliados pelo programa SolidWorks.

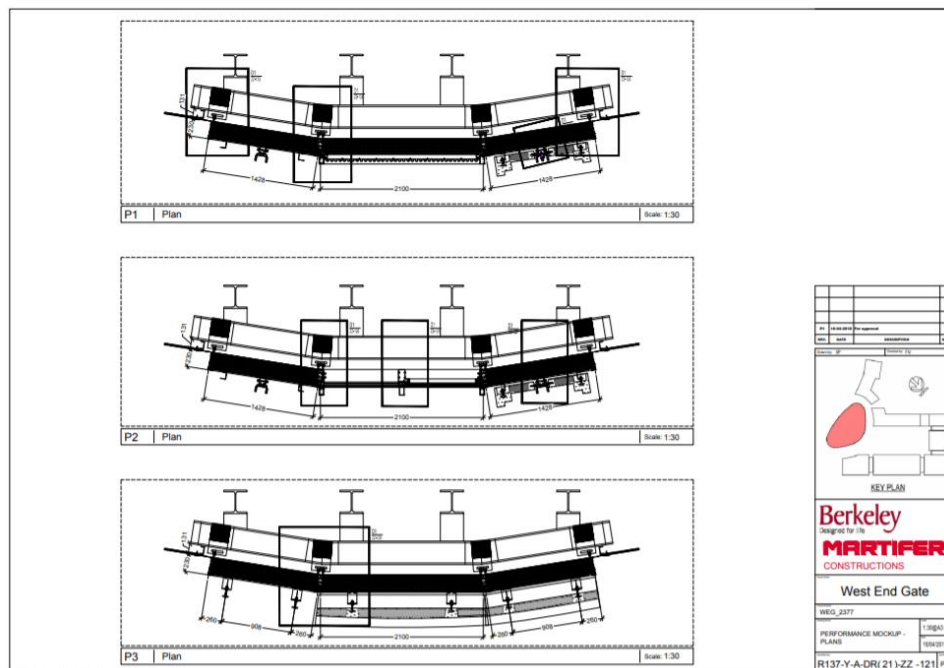
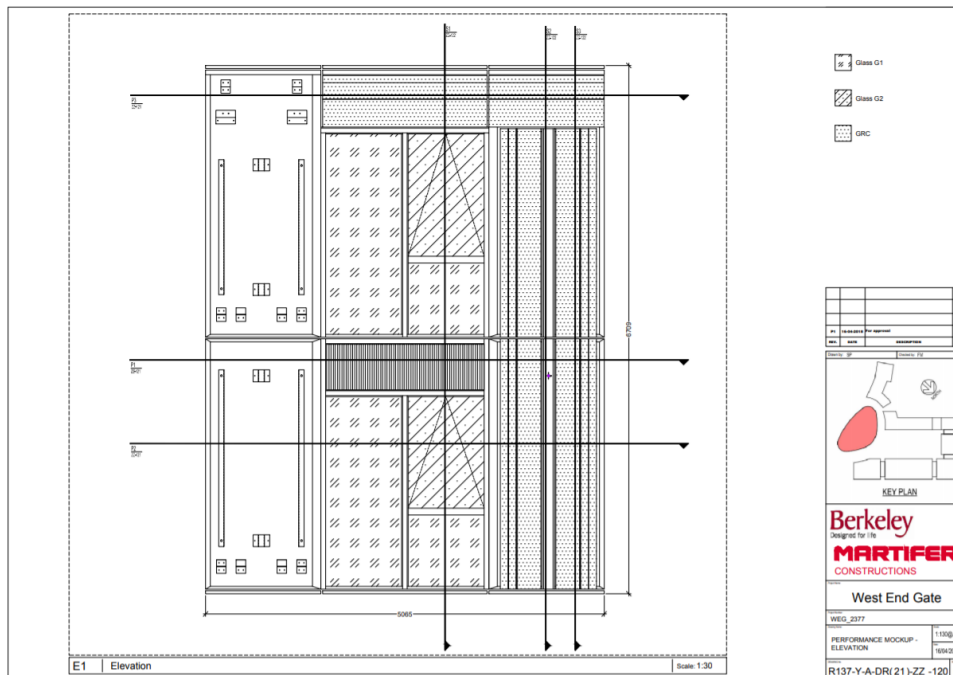
Para a gestão e logística de todos os recursos relacionados com a obra, materiais e humanos, foram utilizados os programas IMS e SAP, referidos anteriormente. Estes programas são utilizados para consultar material disponível, picagem presencial e gestão da obra a nível do fabrico.

2.4.2. Desenhos de aprovação

Um desenho de aprovação, exemplificado na Figura 22, Figura 23 e Figura 24, é um desenho no qual é transmitido ao cliente as soluções propostas em concordância com as especificações do projeto. Estes desenhos, avaliados pelo cliente, requerem, posteriormente, aprovação com a classificação “A” (aprovado), “B” (Aprovado, necessita de pequenas modificações) ou “C” (reprovado). São considerados aprovados apenas os desenhos classificados com “A” sendo que, quando a classificação seja “B” ou “C”, os desenhos ficam requerentes de uma nova aprovação, depois de corrigidos.

Este processo de comunicação entre empresas é realizado por uma plataforma digital designada por “ACONEX” que auxilia a gestão de documentos.

Quando surge alguma dúvida relativamente às especificações requeridas pelo cliente ou arquitetura, são elaborados documentos que visam a resolução de um problema específico urgência. Estes documentos designados de “RFI’s”, são constituídos por a exposição da dúvida ou incorreção em causa e ficheiros anexados que auxiliem uma melhor perceção do problema.



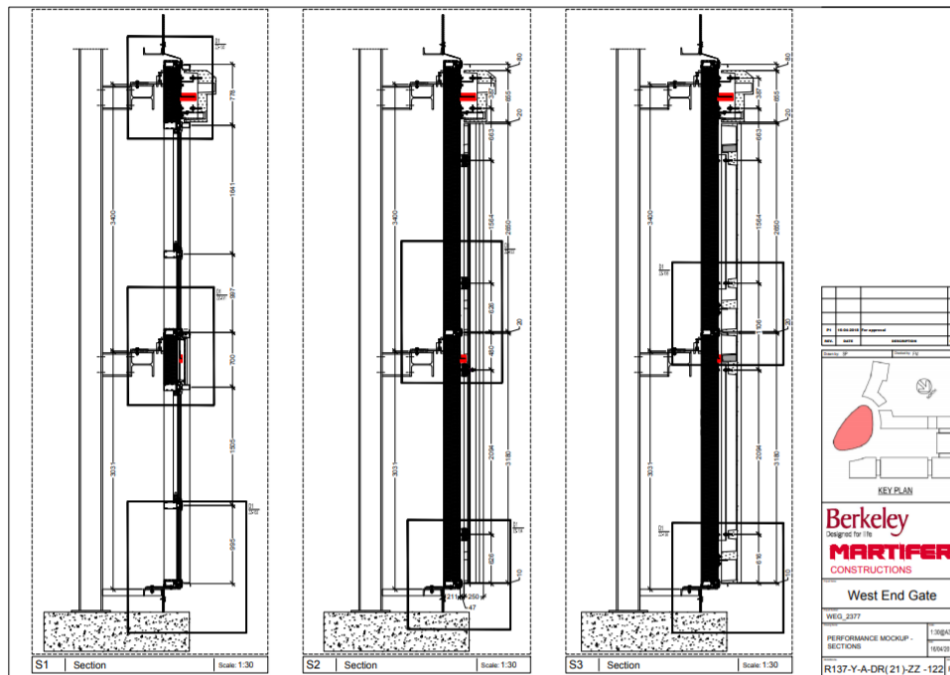


Figura 24 – Desenho de aprovação 3: Alçados PMU (Cortesia: Martifer).

2.4.3. Planos de fabrico

Um plano de fabrico (PF), ilustrado na Figura 25, é um conjunto de desenhos que contêm a informação necessária ao fabrico de determinado módulo, chapa, caixilharia ou elemento da obra. Normalmente, a sua realização tem como objetivo indicar medidas, entalhes ou ligações específicas, maquinagens de perfis ou chapas, quinagens de chapas, drenagens, pormenores e informação detalhada de todos os materiais.

O processo de elaboração de um PF começa inicialmente pelos respetivos desenhos em AutoCAD. Posteriormente, dependendo do tipo de PF, é criado um modelo através de software informático específico, que permite obter a melhor otimização do material, cotas de aplicação de maquinagens e uma lista de corte, que informa o trabalhador da fábrica a maneira correta de proceder ao corte das matérias primas, quer elas sejam chapas ou perfis.

Depois de elaborado todo este trabalho informativo e auxiliar à construção do PF, procede-se à parte logística e burocrática do mesmo, onde é feita uma lista do material disponível necessário para a fabricação do PF. Caso esteja em falta algum material necessário ao plano de fabrico, é possível transferir material de outras obras. Todo este processo é auxiliado por programas informáticos de software IMS e SAP, que permitem uma melhor agilização e gestão dos recursos da empresa.

Por último, depois de finalizado e verificado todo o plano de fabrico, este é submetido para aprovação do responsável do fabrico. Confirmado que o PF está correto e completo, é então enviado para fabrico para se dar início à sua construção.

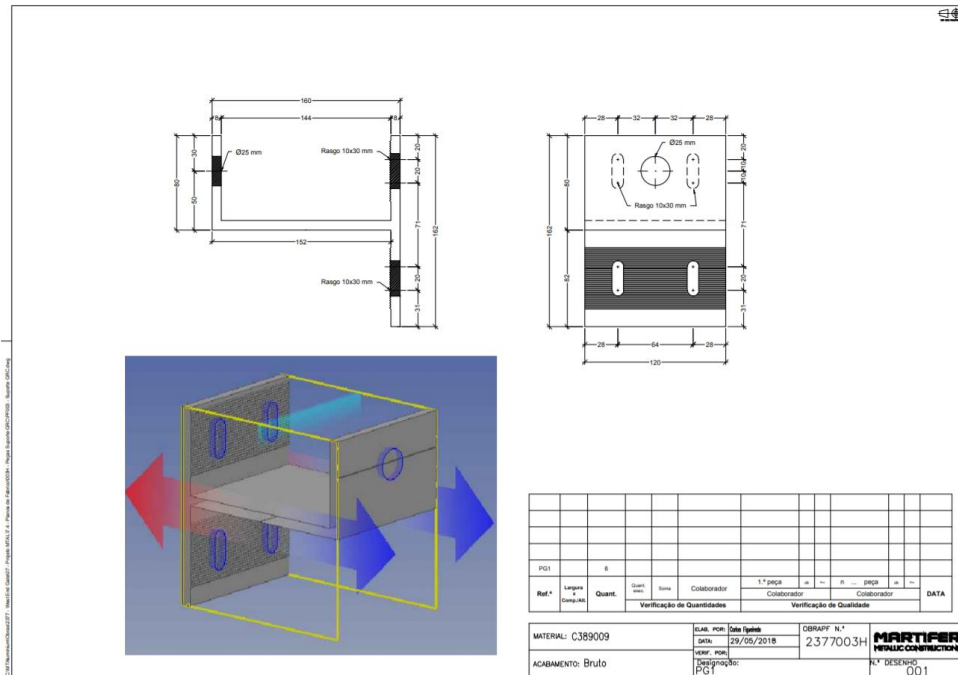


Figura 25 – Plano de fabrico de peça de suporte do GRC (Cortesia: Martifer).

2.4.4. Dossier de montage

Este documento é um conjunto de toda a informação e documentos que permitam explicar a montagem dos elementos em obra. Um dossier de montagem, exemplificado na Figura 26, deve indicar os materiais, as cotas de aplicação pormenores de montagem que permitam uma fácil interpretação dos mesmos, para que a montagem em obra seja facilitada e célere.

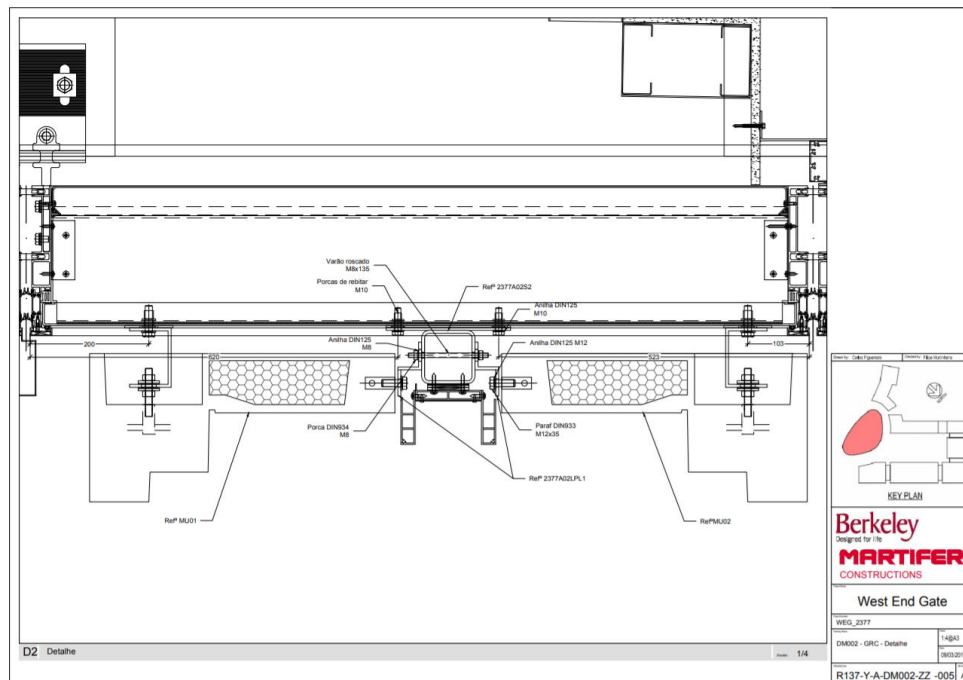


Figura 26 – Desenho de montagem: GRC (Cortesia: Martifer).

2.5. Acompanhamento de obra realizado

O acompanhamento da obra consistiu na concretização de etapas, cada uma com diferentes objetivos e particularidades.

Como a duração do estágio englobou os primeiros meses da obra, neste período foi possível acompanhar o processo de fabricação das primeiras mockup's do projeto e numa fase final, o começo de fabricação dos módulos da fachada do edifício.

Neste subcapítulo são apresentadas todas as etapas ultrapassadas descrevendo todo o processo, o trabalho desenvolvido em cada fase e a finalidade de cada uma.

2.5.1. Visual Mockup (VMU)

Como referido anteriormente, o início da obra coincidiu com o início do estágio curricular o que possibilitou um acompanhamento contínuo e completo de todo o processo.

A primeira fase consistiu na elaboração de uma Visual Mockup, à escala real, com três tipo de módulos da obra e as soluções aprovadas até ao momento. Este protótipo teve como

objetivo apresentar os módulos ao cliente, avaliar o aspeto estético dos mesmos, definir detalhes, escolha de soluções construtivas e a correção de erros de fabrico.

Completar esta meta com sucesso significou um avanço enorme e de extrema importância no projeto, visto que, o feedback recebi do cliente e de todas as partes envolvidas no projeto foi muito positivo, estabelecendo-se assim uma relação de confiança ainda mais reforçada.

Os módulos utilizados na demonstração foram um de GRC vertical, um com janela projetante e um módulo com varanda. A Figura 27 ilustra os painéis construídos. O trabalho efetuado nesta fase englobou maioritariamente a preparação de planos de fabrico (PF's) e a elaboração de desenhos de aprovação.

Os planos de fabrico desenvolvidos consistiram na elaboração de desenhos ilustrativos da caixilharia dos três módulos, peças de amarração dos módulos, estrutura de suporte do GRC, assim como as peças de suporte do mesmo, a janela projetante, um caixilho opaco, localizado na parte superior do módulo varanda, e restantes chapas de cada módulo. O fabrico do GRC utilizado foi da responsabilidade de uma empresa subempreitada.

A amostra foi finalizada em abril tendo a apresentação ocorrido na sede da Martifer, em Oliveira de frades.



Figura 27 – Visual Mockup (Cortesia: Martifer)

2.5.2. Performance Mockup (PMU)

Devido a versatilidade e inovação que constantemente surge nos projetos de fachadas de alumínio, a incorporação de novos sistemas e as diferentes soluções construtivas de cada fachada obrigam a que seja verificada a sua capacidade de cumprir com as exigências funcionais estabelecidas.

Sendo necessário a verificação de todos os requisitos funcionais de cada módulo, esta etapa da obra, paralelamente à visual mockup, consistiu no fabrico de unidades modulares de parte da fachada da obra para serem testadas à estanquidade, resistência ao vento, comportamento térmico do módulo e segurança global do sistema.

Na preparação deste protótipo foram produzidos seis módulos que contemplassem todos os pormenores requerentes de verificação e aprovação.

A Figura 28, ilustra a mockup fabricada e que consistiu na construção de módulos de GRC vertical e horizontal e módulos com projetantes e caixilhos opacos.



Figura 28 – Performance Mockup (Cortesia: Martifer)

Esta fase da obra foi concluída no final de junho com o envio dos módulos para o Reino Unido, local onde se procedeu aos testes.

2.5.3. Fabrico de módulos

O começo da fabricação dos módulos para obra ocorre depois de terem sido aprovadas e verificadas as soluções propostas e comprovadas as exigências funcionais dos módulos.

O trabalho contratualizado entre a Martifer e o cliente envolvia a aplicação da fachada modular do Piso 2 até a cobertura do edifício. Posteriormente, foi atribuído a empresa a construção da restante envolvente do Piso 1 e Piso 0. Assim, durante o estágio foi possível desenvolver trabalho no início da produção dos módulos do Piso 2 da obra que teve início no princípio do mês de julho de 2018.

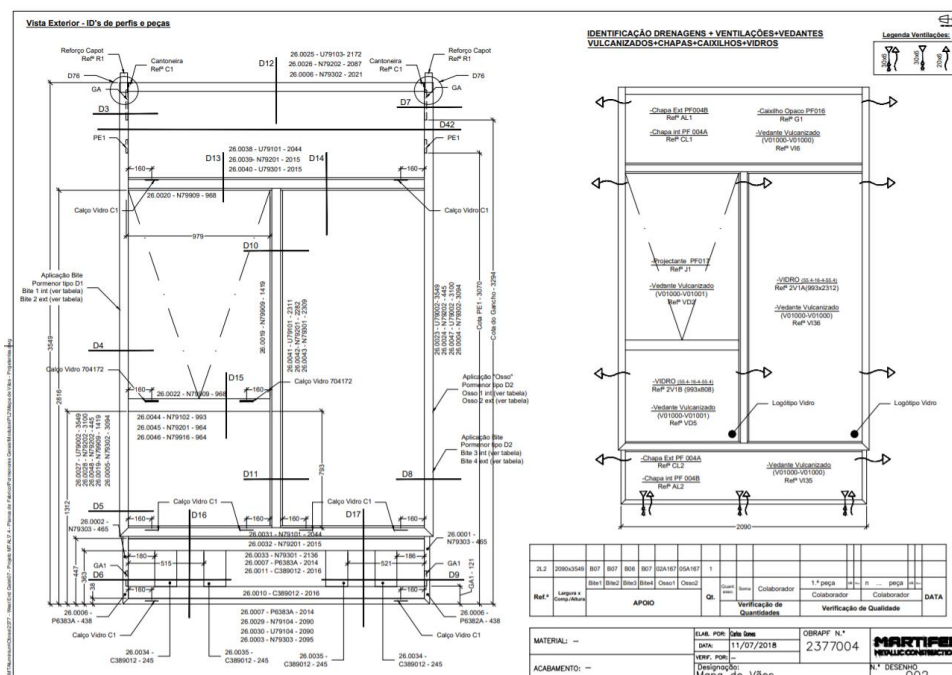


Figura 29 – Alçado de um dos painéis do piso 2 (Cortesia: Martifer).

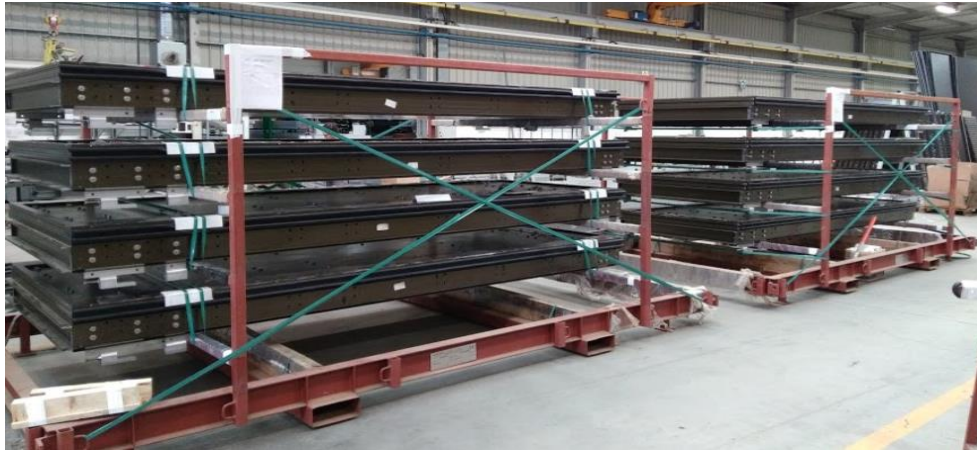


Figura 30 – Módulos finalizados (Cortesia: Martifer).

2.6.Considerações finais

Neste capítulo foi exposto todo o trabalho desenvolvido e os temas abordados no âmbito do estágio curricular como preparador de obra de fachada modular, na empresa Martifer.

Numa abordagem inicial foram referidos os materiais importantes à conceção de fachadas de alumínio e integrantes dos vários sistemas que a compõem, resumindo as suas características, aplicações, processos de conformação e vantagens e desvantagens. Introduziram-se também as exigências funcionais inerentes aos sistemas de alumínios, respetivamente à caixilharia.

Posteriormente, descreveram-se as tipologias de fachadas existentes e que englobaram o processo de aprendizagem que se desenvolveu durante o estágio curricular e às quais pertence o tipo de fachada trabalhado.

Por fim, resumiu-se o trabalho realizado durante o estágio curricular, dividido em duas partes: uma referente ao tipo de trabalho realizado, descrevendo os processos e ferramentas utilizadas, e outra em relação ao acompanhamento da obra, resumindo e enumerando as fases da mesma, explicando os objetivos a cumprir e demonstrando cada uma das etapas com exemplos práticos.

Nesta parte do trabalho é de salientar todas as competências adquiridas resultantes da ultrapassagem dos desafios propostos. As ferramentas informáticas, principalmente o desenho assistido por computador revelou-se uma componente imprescindível ao trabalho desenvolvido.

Capítulo 3

*Análise térmica de perfis metálicos
protegidos*

Análise térmica de perfis metálicos protegidos

3.1 Considerações gerais

3.2 Materiais de proteção passiva ao fogo

3.3 Propriedades térmicas do aço

3.4 Curvas de incêndio utilizadas

3.5 Análises comparativas

3.6 Discussão de resultados

3.7 Conclusões

3. ANÁLISE TÉRMICA DE PERFIS METÁLICOS PROTEGIDOS

3.1.Considerações gerais

Neste capítulo é apresentado o estudo complementar, paralelo ao estágio curricular, que consistiu na análise térmica de vários materiais de proteção passiva ao fogo de perfis metálicos.

O trabalho realizado teve como objetivo comparar três diferentes tipos de análises térmicas: análise simplificada por ábacos, análise simplificada através do programa de cálculo e análise numérica por um programa de elementos finitos. As análises consistiram na avaliação da evolução da temperatura nos perfis ao longo do tempo, e na utilização de diferentes materiais com diferentes espessuras de proteção.

Foram consideradas duas secções, IPE300 e IPE 500, e recorreu-se a softwares especializados para análise e projeto de estruturas metálicas em situação de incêndio, Elefir-EN e Safir, na execução das análises simplificada e numérica, respetivamente.

3.2.Materiais de proteção passiva ao fogo

A utilização de proteção passiva contra incêndios tem como objetivo isolar as estruturas metálicas de altas temperaturas quando estas se encontram expostas ao fogo, sem desenvolver qualquer ação direta sobre o incêndio, aumentando a resistência ao fogo dos elementos de 30 minutos até 4 horas dependendo do material e do tipo de aplicação (Pereira, 2009).

Os requisitos funcionais que são exigidos aos materiais utilizados na proteção contra incêndio são: boa resistência mecânica aos choques e impactos, boa aderência aos elementos a proteger e baixa condutividade térmica, ou grande capacidade térmica, sendo assim bons isolantes térmicos (Vila Real, 2003).

Sendo que estes materiais diferem de acordo com as suas propriedades, tipo de aplicação e comportamento quando sujeitos a altas temperaturas e em contacto direto com o fogo, o conhecimento das características de cada material torna-se essencial no seu estudo.

3.2.1. Betão

A aplicação do betão como proteção contra incêndios pode ser efetuada de forma a envolver totalmente o perfil do elemento a proteger ou, em caso de perfis tubulares, preenchendo todo o seu interior, podendo ser empregues: betão normal e betão leve.

A reduzida difusividade térmica que o betão apresenta faz deste um bom isolante térmico, permitindo assim que o aquecimento do perfil protegido seja feito de forma mais lenta.

As vantagens da aplicação deste material como proteção estão também relacionadas com o aumento de resistência mecânica que o mesmo oferece ao elemento a proteger e com a excelente durabilidade em ambientes agressivos. Porém, em comparação com outros métodos, a utilização do betão implica custos maiores, maior peso na estrutura e uma redução do espaço do compartimento em função das grandes espessuras empregues na sua aplicação (Vila Real, 2003).

3.2.2. Tintas intumescentes

Os revestimentos intumescentes utilizam tinta de características especiais aplicada na superfície do elemento a proteger. Estas tintas constituem derivados celulósicos que, pela adição de ligantes orgânicos especiais e agentes dilatadores, tendem a aumentar de volume quando a temperatura atinge valores entre 100 e 300°C (Vila Real, 2003). Este aumento de volume, tipicamente entre 40 a 50 vezes a espessura de filme de tinta inicial, comporta-se como uma camada protetora que envolve o perfil (ver Figura 31) e reduz o aumento da temperatura no mesmo (Mesquita et al., 2006).



Figura 31 – Camada protetora envolvendo o perfil (SteelConstruction.info, 2014).

Este tipo de proteção é constituído por um catalisador ou agente desidratante ácido, geralmente polisfosfato de amónio, um agente carbonífero, como o pentaeritritol, e por um agente expensor, que, por norma, é formado por componentes nitrogenados como a melamina (Mesquita et al., 2005) .

O processo de intumescência caracteriza-se pela decomposição do catalisador aproximadamente aos 150°C. A uma temperatura superior, o ácido formado vai reagir com o agente carbonífero e a uma temperatura entre os 200 e os 300°C, dependendo do agente expensor, dá-se a decomposição deste, formando-se gases que vão expandir o resíduo carbonoso gerando uma espuma de cor preta. Por volta dos 700°C a camada superficial transforma-se numa camada cerâmica porosa de cor branca e de baixa condutividade térmica (Mesquita et al., 2005).

Em comparação com outros materiais, a utilização de tinta intumescente como proteção contra incêndios, provoca um peso menor na estrutura, assim como a possibilidade de aplicação em estaleiro e a obtenção de um bom acabamento superficial final. Porém, a sua aplicação exige uma elevada experiência e um elevado controlo de qualidade e medidas de espessuras constantes pelo que, é necessário mão de obra qualificada e condições atmosféricas aceitáveis, o que não acontecendo, leva à interrupção da obra e por sua vez custos adicionais (Mesquita et al., 2005).

O processo de aplicação de proteção intumescente consiste na decapagem do aço, seguida da aplicação de um primária anti corrosão e, posteriormente, a tinta intumescente (Vila Real, 2003).

3.2.3. Argamassa projetada

A argamassa projetada é um produto com alto conteúdo de aglomerantes que, ao ser misturado com água, gera uma massa fluída, que poderá ser facilmente bombeada, como é ilustrado na Figura 32. Por norma, os aglomerantes são constituídos por gesso, aproximadamente 80% do peso seco, cimento, principalmente em materiais de alta e média densidade, cargas inertes, tais como poliestireno expandido, celulose e preservantes.



Figura 32 – Aplicação de argamassa projetada (Vila Real, 2016).

Os sistemas de ancoragem são normalmente dispensados para aços não pintados, com exceção de elementos de excessiva altura, visto estes apresentarem boas condições de aderência. Em situações de altura excessiva, poderá ser utilizado algum tipo de ancoragem mecânica, como por exemplo, telas de fixação.

Este tipo de proteção é ativado quando ocorrem temperaturas entre 90 a 150°C e originam alterações químicas no gesso, libertando água de hidratação. Esta reação impede o aumento da temperatura no elemento de aço entre um intervalo de tempo de 20 a 30 minutos durante a primeira hora crítica do incêndio (Vila Real, 2003).

- **Vermiculite e Perlite**

A vermiculite e perlite são dois matérias que compõe as argamassas e que o método de aplicação consiste, essencialmente, por projeção. A vermiculite é uma rocha mineral, de aspeto exfoliado, que se apresenta sob a forma de lâminas finas separadas uma das outras por partículas microscópicas de água. Paralelamente às tintas intumescentes, este material quando sujeito a altas temperaturas, na ordem dos 700 a 1000°C, aumenta 20 a 30 vezes o

seu tamanho, confinando o ar desidratado entre as paredes. Este processo, designado por exfoliação, permite obter a vermiculite expandida e resulta da transformação das partículas de água em vapor.

Uma das mais valias da utilização deste material na proteção ao fogo, está relacionado com o seu ponto de fusão situado por volta dos 1370°C, sendo ideal para a fabricação de painéis de proteção, que não libertam fumo nem gases tóxicos.

A aplicação de vermiculite expandida é feita através da projeção de argamassas leves (ver Figura 33). Tal como a vermiculite, a perlite é um material mineral, que expande o seu tamanho quando em contacto com altas temperaturas. A sua aplicação é idêntica à vermiculite (Vila Real, 2003).



Figura 33 – Vermiculite aplicada em perfil metálico (Knight, 2017).

3.2.4. Fibras minerais

As fibras minerais são produtos de baixa e média densidade, contendo basicamente fibras obtidas a partir de rocha basáltica como principal ingrediente (Pinto, 2008). Aplicação destes materiais é feita geralmente por projeção pneumática, sendo que, podem ser utilizadas placas rígidas ou semirrígidas (Vila Real, 2003).

- **Placas de lã de rocha**

As placas de lã de rocha, provenientes de fibras minerais, são painéis de baixa densidade, rígidos ou flexíveis, feitos de materiais fibrosos, aglomerados pela adição de resinas termo-endurecíveis (Pinto, 2008). São totalmente imunes à ação do fogo e possuem excelentes propriedades de isolamento térmico e acústico. Por norma a sua utilização é feita

de modo a proteger equipamentos e superfícies cilíndricas, e a sua fixação é realizada através de pinos de aço soldados à estrutura metálica, como é ilustrado na Figura 34 – a).

- **Placas de lã mineral**

A lã de vidro, (Figura 34 – b)), provém de uma substância líquida inorgânica resultante de um composto básico de vários elementos entre os quais, a sílica, em forma de areia, que tem a função de vitrificante, o carbonato de sódio, sulfato de sódio e potássio. Esta mistura é englobada também por carbonato de cálcio e magnésio, atuando como estabilizantes para conferirem a este material uma elevada resistência à humidade (Pereira, 2009).



a)



b)

Figura 34 – Proteção em placas: a) lã de rocha; b) lã de vidro. (Isover, 2017; Termolan, 2016)

3.2.5. Placas de gesso

O gesso é um sulfato de cálcio que, no estado seco, contém cerca de 20% de água cristalizada. Quando sujeito a altas temperaturas, transforma-se num sulfato de cálcio anidro, com absorção de grande quantidade de calor. Ao absorver grande quantidade de calor quando sujeito ao fogo, o gesso atrasa a passagem do fluxo térmico funcionando assim como material de proteção térmica (Vila Real, 2003). A facilidade que este material tem de absorver água, faz com que a humidade do ar em áreas fechadas seja conservada. Além disso, apresenta-se também como um bom isolante térmico e acústico (Pinto, 2008).

A aplicação desta solução é realizada através de placas, às quais é adicionado fibra de vidro ou uma rede metálica, sob a forma de suporte, que evita a desagregação do elemento protegido, como ilustrado na Figura 35. A produção desta solução é feita em fábrica, o que garante o cumprimento das especificações no que diz respeito às espessuras requeridas.

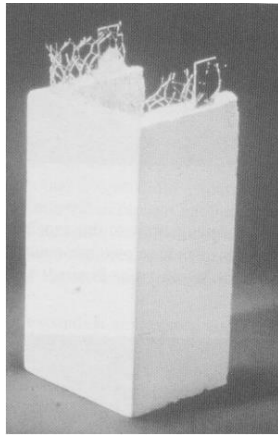


Figura 35 – Proteção ao fogo através de placas de gesso (Pannoni, 2017).

3.2.6. Considerações finais

O estudo das propriedades térmicas dos materiais significa uma percentagem significativa no estudo e análise de materiais de proteção ao fogo.

Na Tabela 3, com o objetivo de clarificar e resumir as características térmicas dos materiais de proteção ao fogo, são indicadas as propriedades térmicas de alguns materiais mencionados anteriormente.

Tabela 3 – Propriedades térmicas de materiais de proteção passiva ao fogo (Vila Real, 2003).

Material	Massa Volúmica, ρ_p, kg/m³	Condutividade térmica, λ_p, W/mk	Calor específico, c_p, J/kgK
Materiais de projeção:			
- Fibra mineral	300	0,12	1200
- Cimento de vermiculite	350	0,12	1200
- Perlite	350	0,12	1200
Materiais de projeção de alta densidade:			
- Vermiculite/perlite e cimento	550	0,12	1100
- Vermiculite/perlite e gesso	650	0,12	1100
Placas:			
- Vermiculite/perlite e cimento	800	0,2	1200
- Silicato fibroso ou silicato de cálcio de fibroso	600	0,15	1200
Fibrocimento	800	0,15	1200
Placas de gesso	800	0,2	1700
Placas de fibra compactas:			
- Silicato fibroso, lã de rocha, lã mineral	150	0,2	1200
Betão normal	2300	1,6	1000
Betão leve	1600	0,8	840
Bloco de betão	2200	1,0	1200

3.3. Propriedades térmicas do aço

Este subcapítulo pretende apresentar as propriedades térmicas dos materiais que influenciam a evolução da temperatura em caso de incêndio, explicando o seu significado físico.

A introdução deste capítulo torna-se necessária, pelo facto de as propriedades térmicas dos materiais possuírem um papel determinante e de elevada importância na execução de análises térmicas.

3.3.1. Calor específico

O calor específico, c , corresponde à quantidade de calor que é necessário fornecer à unidade de massa de um material para que a sua temperatura aumente uma unidade. É expresso nas unidades J/kgK .

No aço, o calor específico, c_a (Figura 36), é definido pelo EN 1993-1-2 através das seguintes expressões (CEN, 2010b):

- Para $20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 600^\circ\text{C}$:

$$c_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1}\theta_a - 1,69 \times 10^{-3}\theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6}\theta_a^3 \quad (3.1)$$

- Para $600^\circ\text{C} \leq \theta_a < 735^\circ\text{C}$:

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \quad (3.2)$$

- Para $735^\circ\text{C} \leq \theta_a < 900^\circ\text{C}$:

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \quad (3.3)$$

- Para $900^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^{\circ}\text{C}$:

$$c_a = 650 \quad (3.4)$$

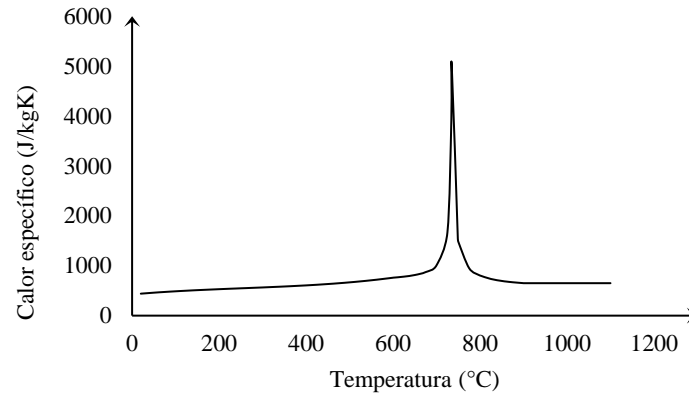


Figura 36 – Calor específico do aço (CEN, 2010b).

3.3.2. Condutividade térmica

A condutividade térmica de um material, λ , expressa nas unidades W/mK , corresponde à quantidade de calor que, na unidade de tempo, é transmitida, por condução, entre duas superfícies de área unitária, distantes entre si de uma unidade de comprimento e cujas temperaturas diferem de um grau.

A condutividade térmica do aço, λ_a , encontra-se representada na Figura 37 e é definida no EN 1993-1-2, pelas expressões seguintes (CEN, 2010b):

$$\lambda_a = 54 - 3,33 \times 10^{-2} \theta_a \quad 20^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 800^{\circ}\text{C} \quad (3.5)$$

$$\lambda_a = 27,3 \quad 800^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 1200^{\circ}\text{C} \quad (3.6)$$

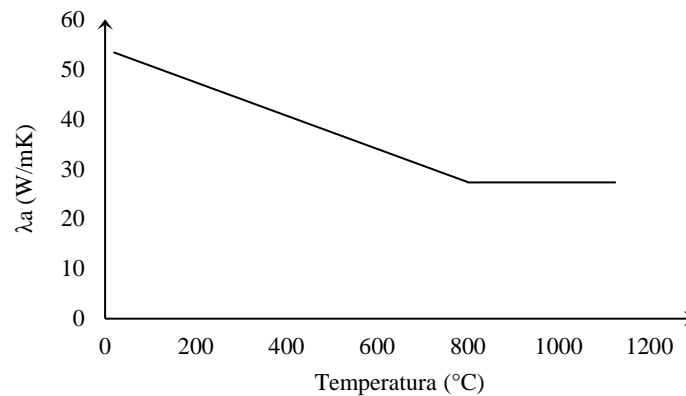


Figura 37 – Condutividade térmica do aço (CEN, 2010b).

3.4. Curvas de incêndio utilizadas

As curvas de incêndio são expressões analíticas que procuram verificar a evolução da temperatura em função do tempo.

O EN 1991-1-2 define as curvas de incêndio em dois grupos: nominais, utilizadas para classificar ou verificar a resistência ao fogo de um elemento ou estrutura, e paramétricas, “definidas com base em modelos de incêndio e nos parâmetros físicos específicos que definem as condições no compartimento de incêndio” (CEN, 2010a).

Neste trabalho são utilizadas as curvas de incêndio padrão ISO 834, para o estudo dos materiais utilizados como proteção passiva ao fogo, e a curva de aquecimento lento, definida na norma EN 13381-8, no estudo da tinta intumescente pelo facto de este ser um material reativo ao fogo.

3.4.1. Curva de incêndio padrão ISO 834

A curva de incêndio padrão ISO 834 serve para “representar um modelo de um incêndio totalmente desenvolvido num compartimento” (CEN, 2010a). Apesar de não representar um incêndio real, a mais valia desta curva passa por aproximar os programas térmicos dos ensaios experimentais em forno, o que permite, a comparação de resultados experimentais obtidos em diferentes laboratórios do mundo (Vila Real, 2003). É definida pela equação (3.7):

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.7)$$

3.4.2. Curva de aquecimento lento

A curva de aquecimento lento (CAL) possui uma taxa de aumento de temperatura inferior à curva de incêndio padrão. É aplicada a materiais de proteção passiva ao fogo, geralmente em ensaios a elementos de aço pintados com tinta intumescente, quando é esperado que o desempenho do material seja substancialmente menor do que quando comparado com a curva temperatura/tempo padrão (CEN, 2010c).

Como já foi referido, é de especial importância para este trabalho e pode ser definida pelas equações (3.8) e (3.9) (CEN, 2010c).

$$T = 20 + 154\sqrt[4]{t} \quad 0 \leq t \leq 20 \quad (3.8)$$

$$T = 21 + 345 \log_{10}[1 + 8(t - 20)] \quad t > 20 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.9)$$

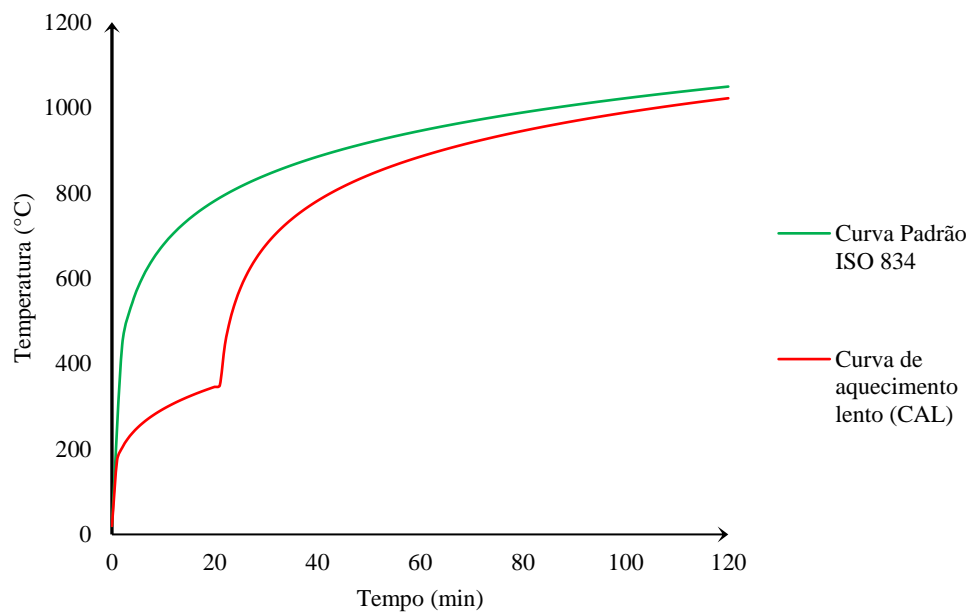


Figura 38 – Curvas de aquecimento consideradas nas análises (CEN, 2010a, 2010c).

3.5. Análises comparativas

3.5.1. Análise simplificada (Ábacos)

Uma possível análise térmica corresponde a interpolar resultados de ábacos previamente elaborados. Estes ábacos foram desenvolvidos com a base analítica que se apresenta nesta secção e podem ser consultados no Anexo 10 do livro “Incêndio em Estruturas Metálicas – cálculo estrutural”, do Prof. Paulo Vila Real (Vila Real, 2003).

Para que as estruturas de aço consigam cumprir os parâmetros de resistência ao fogo, muitas vezes é necessário proteger os elementos de aço com materiais termicamente isolantes (Vila Real, 2003). Com esta necessidade, torna-se então necessário compreender e avaliar a evolução da temperatura no perfil metálico ($\Delta\theta_{a,t}$) ao longo do tempo (Δt) e, segundo o EN 1993 1-2, a evolução da temperatura no perfil ($\Delta\theta_{a,t}$) ao longo de um intervalo de tempo (Δt), é traduzida pela equação (3.10) (CEN, 2010b)

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p / V}{d_p c_a \rho_a} \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{(1 + \emptyset/3)} \Delta t - (e^{\emptyset/10} - 1) \Delta\theta_{g,t} \quad [^\circ\text{C}] \quad (3.10)$$

Em que a quantidade de calor armazenada na proteção é definida por:

$$\emptyset = \frac{c_p d_p \rho_p}{c_a \rho_a} \times \frac{A_p}{V} \quad (3.11)$$

Quando a capacidade térmica de um material de proteção ao fogo não for superior a metade da capacidade térmica do aço (equação (3.12)), este é considerado um material leve e então, é possível assumir a aproximação de $\emptyset = 0$.

$$d_p A_p c_p \rho_p < \frac{c_a \rho_a V}{2} \quad (3.12)$$

A equação (3.10), possibilitou a construção de tabelas e ábacos correspondentes a perfis protegidos sujeitos ao incêndio padrão. A utilização destas tabelas e ábacos evita a resolução da equação (3.10) e facilita o cálculo da temperatura em função do fator de massividade modificado:

$$\left(\frac{A_p}{V}\right) \times \left(\frac{\lambda_p}{d_p}\right) \quad (3.13)$$

No entanto, estas tabelas e ábacos foram obtidos apenas para materiais leves ($\emptyset = 0$), sendo que para proteção ao fogo com materiais pesados é necessário realizar uma correção do fator de massividade modificado definido anteriormente, usando a equação (3.14) (Vila Real, 2003):

$$\frac{A_p}{V} \frac{\lambda_p}{d_p} \left(\frac{1}{1 + \emptyset/2} \right) \quad (3.14)$$

A utilização do fator de massividade modificado (3.13) consiste em aumentar a capacidade térmica do aço em metade da capacidade térmica do material de proteção. Assim, conclui-se que a temperatura de um elemento de aço protegido por um material de proteção pesado pode ser obtida aproximadamente fazendo $\emptyset = 0$ na equação (3.10) e substituindo o fator de massividade modificado (3.13) pelo fator de massividade corrigido (3.14).

A análise simplificada através de ábacos resultantes do EN 1993 1-2 foi realizada de acordo com o processo descrito, considerando as propriedades térmicas de cada material de proteção e condições de ensaio.

3.5.2. Análise simplificada (Elefir-EN)

A análise simplificada com base no programa Elefir-EN realizou-se através de ensaios das condições previamente estabelecidas, simuladas no programa. Este software avalia a resistência ao fogo de elementos de carbono e aço inoxidável carregados em torno do eixo forte ou sobre o eixo fraco, de acordo com o EN 1991-1-2. O programa possibilita o cálculo da temperatura crítica, tempo crítico, função de resistência da temperatura do aço e função de resistência de um dado tempo para membros sujeitos a determinados esforços. Relativamente à capacidade de análise térmica que o programa oferece, é possível calcular a espessura do material de proteção contra incêndio necessário para garantir os parâmetros de determinada resistência ao fogo, cálculo do tempo para atingir a temperatura crítica do elemento e cálculo da temperatura após o tempo crítico introduzido (Vila Real & Franssen, 2010).

O software permite a aplicação da análise simplificada referida anteriormente para qualquer caso de estudo.



Figura 39 – Programa Elefir-EN.

3.5.3. Análise numérica (SAFIR)

A análise numérica foi realizada com recurso a programas de cálculo de elementos finitos.

Utilizou-se o programa GiD, um programa de modelação geométrica e entrada de dados de diversos programas de simulação numérica, para a obtenção da malha de elementos finitos. Este programa foi desenvolvido pelo CIMNE (Centro Internacional de Métodos Numéricos em Engenharia) em Barcelona, Espanha, e “foi projetado para cobrir todas as necessidades comuns no campo da simulação numérica desde a modelação geométrica, definição efetiva de dados de análise, geração da malha, transferência de dados para software de análise, assim como a visualização de resultados” (CIMNE, 2018).

O GiD facilitou a definição da geometria do perfil e da proteção, assim como as condições de fogo aplicáveis, as propriedades dos materiais e a elaboração da malha de elementos finitos.

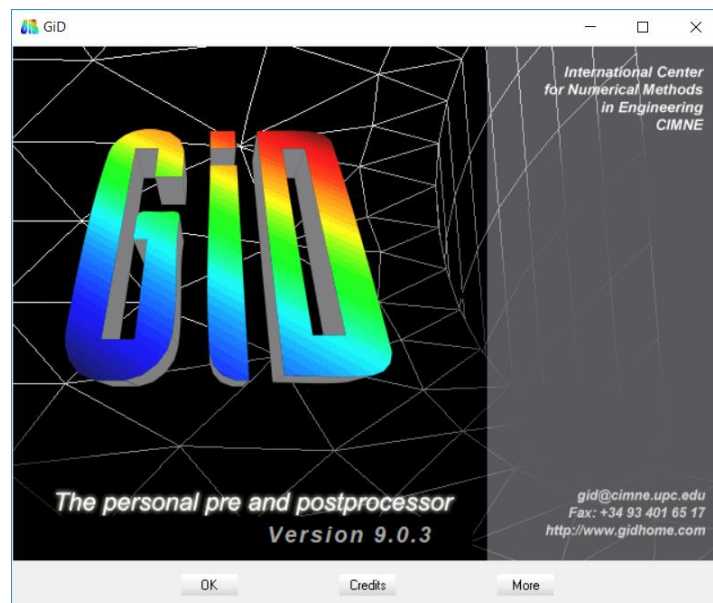


Figura 40 – Programa GiD.

A simulação do modelo preparado em GiD foi depois processada no SAFIR, um programa de elementos finitos, desenvolvido na Universidade de Liege, direcionado para o estudo de estruturas em caso de incêndio (Franssen & Gernay, 2017). O programa acomoda

vários elementos para diferentes simulações, procedimentos de cálculo e vários modelos de materiais para incorporar no comportamento. Os elementos podem ser elementos sólidos 2D, elementos sólidos 3D, elementos viga, elementos cascas e elementos barras (Amaral, 2008). Neste estudo foram apenas realizadas simulações de elementos sólidos 2D.

Os conceitos teóricos que surgem como base dos programas de elementos finitos para análises térmicas têm como referência condições de fronteira, em que as transferências de calor entre materiais ocorrem por processos de convecção e radiação, e propriedades térmicas, tais como a condutividade térmica e o calor específico, que interferem na condução de calor no material, através da equação de Fourier, traduzido na equação (3.15) (Lopes, 2018):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_a \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_a \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + Q = \rho_a c_a \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (3.15)$$

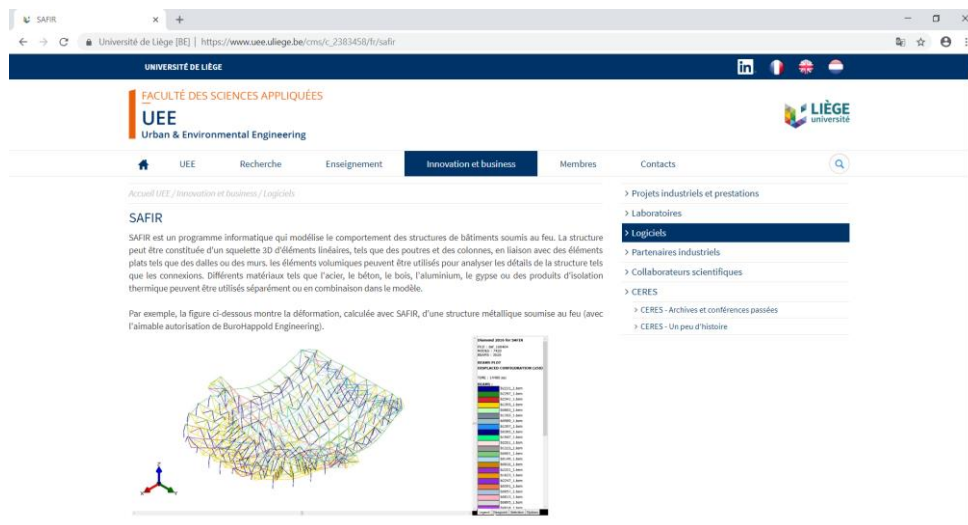


Figura 41 – Site do programa SAFIR.

3.6. Discussão de resultados

Os casos de estudo apresentados de seguida resumem os resultados do trabalho desenvolvido em relação ao estudo complementar, realizado em paralelo com o estágio curricular, que visa analisar materiais de proteção passiva ao fogo de estruturas metálicas, com recurso a três análises diferentes.

Foram utilizadas duas secções de perfis metálicos, IPE 300 e IPE 500, de forma a comparar os resultados de dois fatores de massividade distintos. Nos ensaios submeteram-se os perfis protegidos à curva de incêndio padrão ISO834, com exceção da tinta intumescente que foi, adicionalmente, submetida à curva de incêndio padrão e a curva de aquecimento lento (CAL).

Relativamente à tinta intumescente, utilizou-se o intumescente “E3” do artigo “*Comportamento de vigas em aço protegidas com tinta intumescente*” (Mesquita et al., 2005) e as propriedades térmicas aí indicadas, cuja condutividade térmica (λ_p), foi obtida através do gráfico da Figura 42, o calor específico, $c_p = 1000 \text{ J/kgK}$ e a massa volúmica, $\rho_p = 1360 \text{ kg/m}^3$.

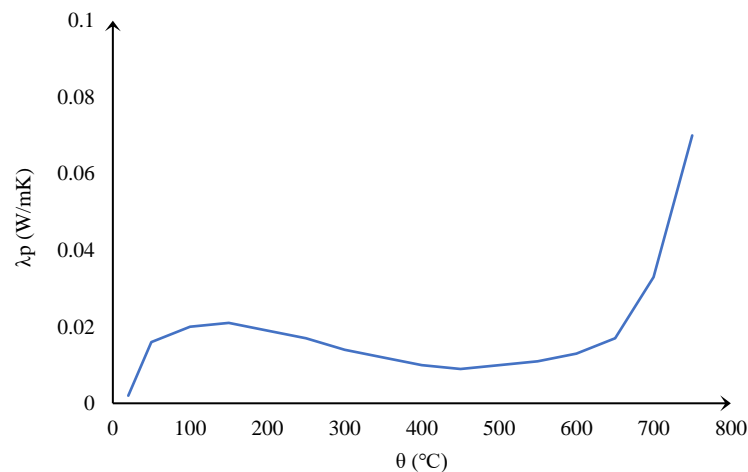


Figura 42 – Condutividade térmica do intumescente “E3” (Mesquita et al., 2005)

3.6.1. Ábacos vs. Elefir-EN

A primeira análise efetuada consistiu na comparação das duas análises simplificadas referidas anteriormente, ábacos e Elefir-EN.

O procedimento seguido baseou-se na obtenção das espessuras de proteção, d_p , para temperaturas críticas, θ_{cr} , entre 500 e 850 °C, em função da resistência (R60, R90, R120) com recurso aos ábacos. Posteriormente, obtidas as espessuras de proteção através dos ábacos, aplicou-se o mesmo processo no programa Elefir-EN, exportando depois os resultados das espessuras obtidas para os gráficos que serão apresentados.

Na Figura 43 e Figura 44 estão representados os gráficos obtidos das análises realizadas para as duas secções em estudo e para os diferentes materiais de proteção utilizados, submetidos a curva de aquecimento ISO 834.

O exemplo seguinte demonstra os cálculos efetuados para a obtenção das espessuras de proteção considerando os dados para da Tabela 4, para a secção IPE 500 e o material de proteção vermiculite e cimento para $\theta_{cr}=500^\circ\text{C}$ e para R90.

Tabela 4 – Valores considerados para o material Vermiculite e Cimento.

$\frac{A_p}{V}$	λ_p	c_p	ρ_p
150 m ⁻¹	0,12 W/mK	1100 J/(kgK)	550 kg/m ³

Obteve-se, através dos abacos, o fator de massividade modificado para a temperatura pretendida e calculou-se a espessura de proteção (d_p). De seguida verificou-se se o material era “leve” ou “pesado” e, neste caso, sendo o material utilizado, “pesado”, pelo facto de $d_p \left(\frac{A_p}{V} \right) c_p \rho_p > \frac{c_a \rho_a}{2}$ procedeu-se a uma iteração de modo a obter a espessura final em função do cálculo do valor \emptyset pela equação (3.11).

Tabela 5 – Verificação se o material é leve ou pesado.

$\left(\frac{A_p}{V}\right) \times \left(\frac{\lambda_p}{d_p}\right)$	670,0
d_p (mm)	26,9
$d_p \left(\frac{A_p}{V}\right) c_p \rho_p$	2438060
$\frac{c_a \rho_a}{2}$	2355000
Material Pesado	

Tabela 6 – Exemplo de iteração realizada para cálculo de espessura para material pesado.

d_p (mm)	ϕ	$d_{p,final}$
0,027	0,52	0,021
0,021	0,41	0,022
0,022	0,43	0,022

• **IPE 300**

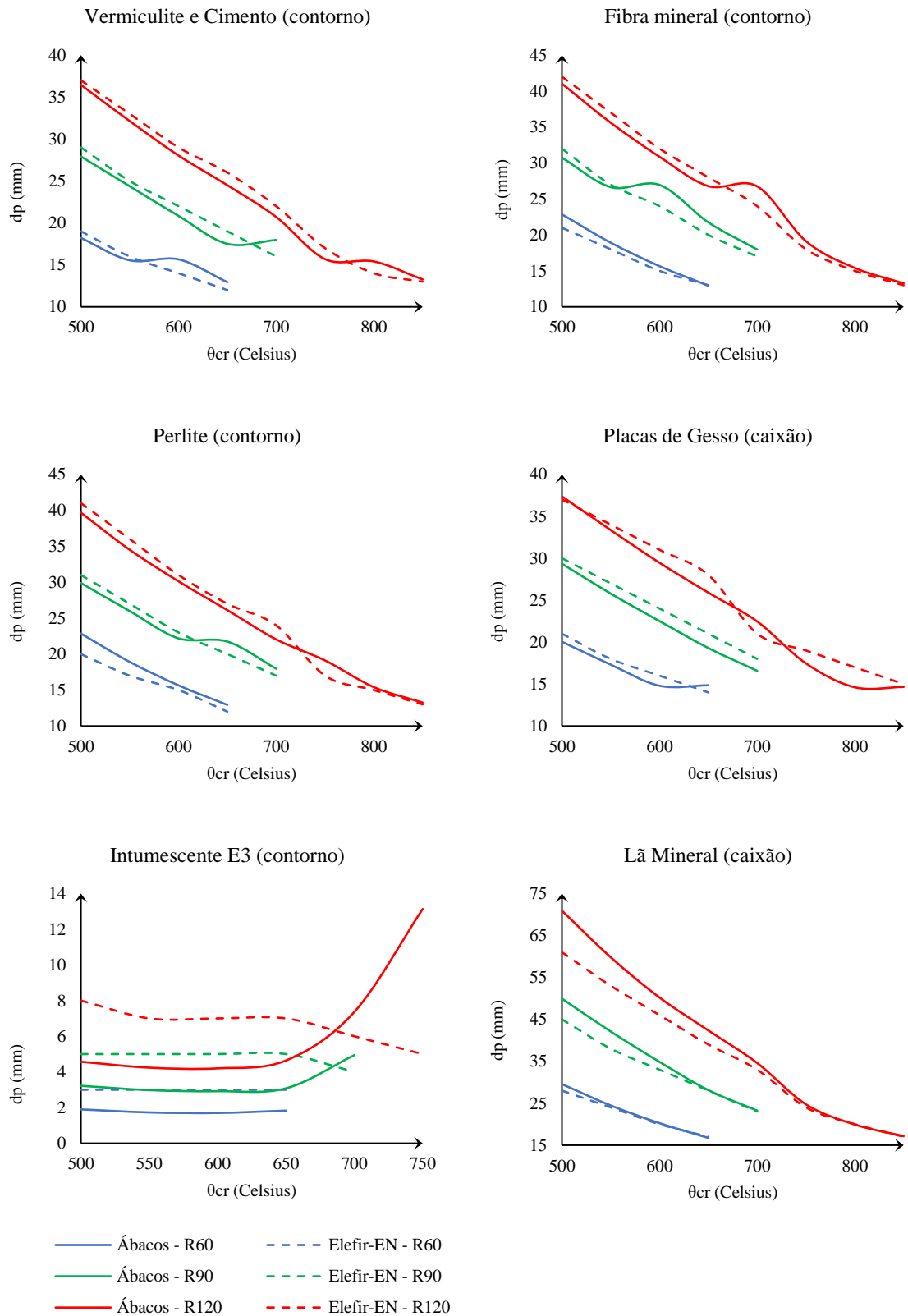


Figura 43 – Análise comparativa “Ábacos vs. Elefir-EN” – IPE 300.

• **IPE 500**

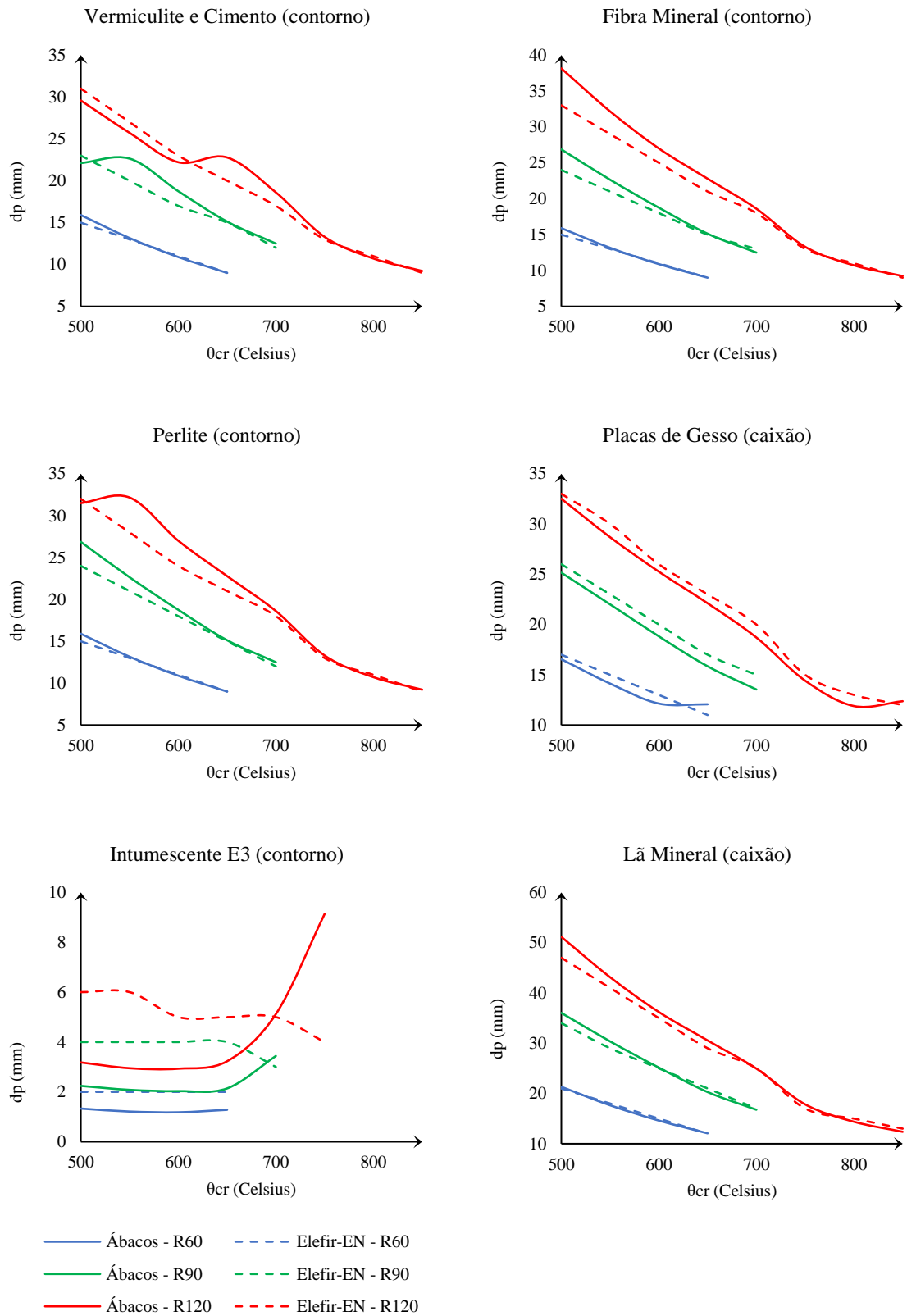


Figura 44 – Análise comparativa “Ábacos vs. Elefir-EN” – IPE 500.

Em primeiro lugar, realizando uma análise visual dos gráficos, é notório uma grande proximidade e igualdade de resultados entre as duas análises, como seria previsto, apresentando algumas ligeiras diferenças no intumescente E3 e diferenças pontuais nos restantes materiais. Estas diferenças ocorrem principalmente, quando o material passa de material pesado para material leve, verificando-se uma ligeira subida da espessura de proteção no momento desta transição. Estas alterações observam-se de forma mais visível nos materiais vermiculite e cimento e placas de gesso, no caso do perfil IPE 300 e vermiculite e cimento e perlite, no perfil IPE 500.

Em relação à amplitude de temperaturas críticas abrangidas pelo estudo, surge uma ligeira discrepância em todos os materiais, entre os valores de 500 e 700°C, aproximadamente, com maior relevância nos gráficos do perfil IPE 500, sendo que para temperaturas próximas dos 800°C ambas as análises convergem para os mesmos valores de espessura.

Em relação aos resultados obtidos para o intumescente E3 é possível observar uma diferença significativa de espessuras relativamente às duas análises realizadas. Esta desigualdade pode ser justificada pela impossibilidade de o programa Elefir-EN apenas apresentar resultados sem casas decimais, arredondados à unidade, e/ou, por outro lado, os ábacos serem resultado de aproximações das expressões do EN1993-1-2 com erros associados, que podem ter influenciado os resultados de todos os materiais e ter tido maior impacto e visibilidade para o intumescente E3, pelo facto de este requerer menores espessuras de proteção.

No intumescente E3 é também visível nas duas secções um aumento exponencial da espessura de proteção. Esta “anomalia” deve-se a um conjunto de fatores relacionados com as propriedades térmicas do material. A principal razão deste aumento prende-se com o aumento similar que ocorre na condutividade térmica do material para temperaturas elevadas (>650°C) que se pode visualizar na Figura 42.

3.6.2. Elefir-EN vs. SAFIR

A seguinte análise apresenta uma comparação dos resultados de espessura de proteção obtidos na análise anterior no programa Elefir-EN com espessuras de proteção obtidas de modelos de elementos finitos do programa SAFIR.

Os modelos no SAFIR foram realizados utilizando valores de referência do programa Elefir-EN, obtidos no ponto anterior, e assumindo valores intervalados da amplitude de espessuras de cada material.

Nesta comparação de análises foi introduzida a curva de aquecimento lento (“CAL”), tendo sido utilizada em paralelo com a curva padrão ISO 834 em novas simulações do programa Elefir-EN e nos modelos de SAFIR.

A Figura 45 exemplifica um modelo obtido através do SAFIR para um perfil IPE 500, protegido com 0,01 m de vermiculite e cimento, em contorno e outro protegido com 0,01m de placas de gesso, em caixão. As temperaturas foram retiradas entre o eixo da alma e o eixo do banzo com o objetivo de obter uma média entre a temperatura mais alta e a temperatura mais baixa.

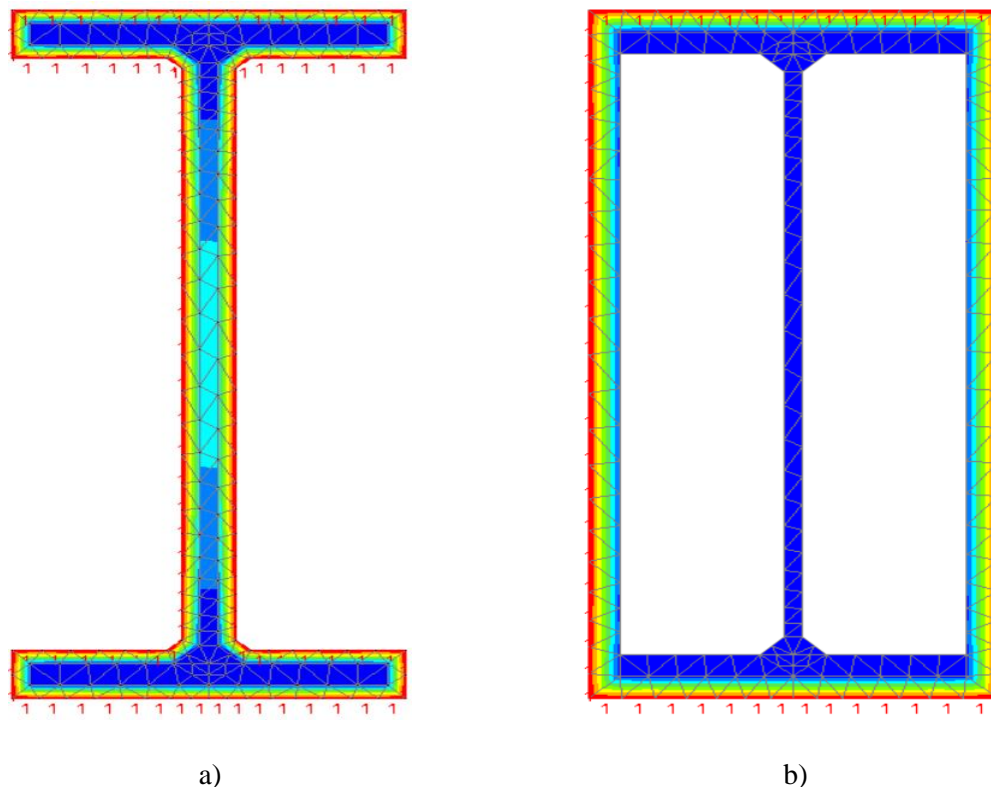


Figura 45 – Exemplo de modelo realizado no programa SAFIR: a) proteção em contorno; b) em caixão.

• IPE 300

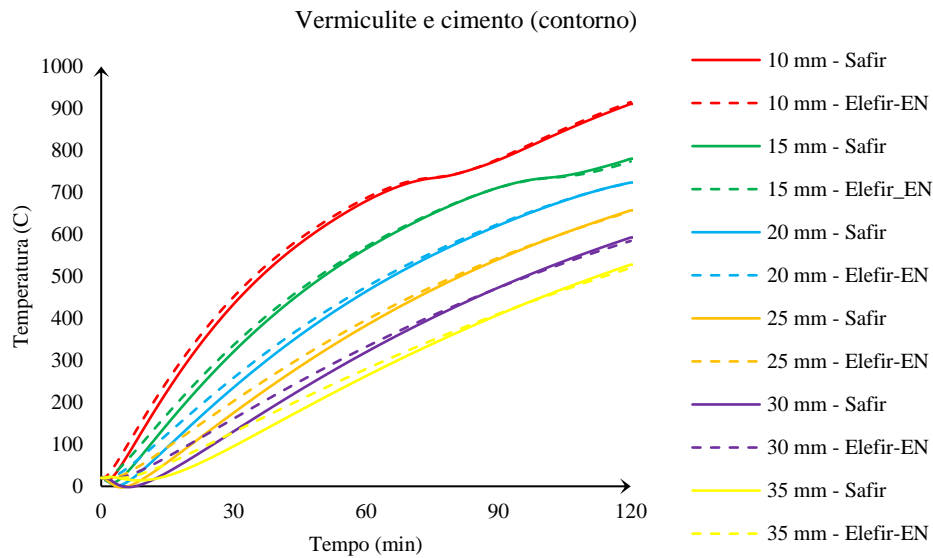


Figura 46 – Vermiculite e cimento, curva ISO 834.

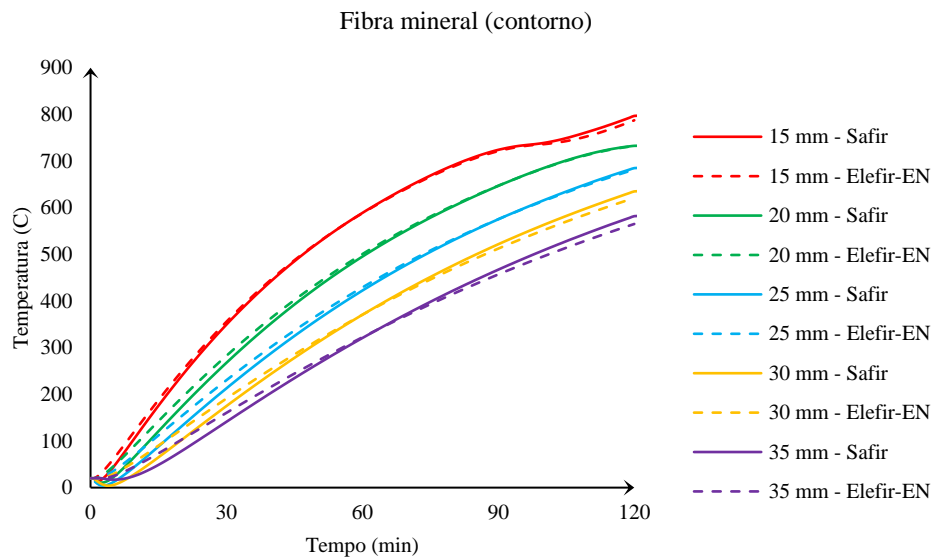


Figura 47 – Fibra mineral, curva ISO 834.

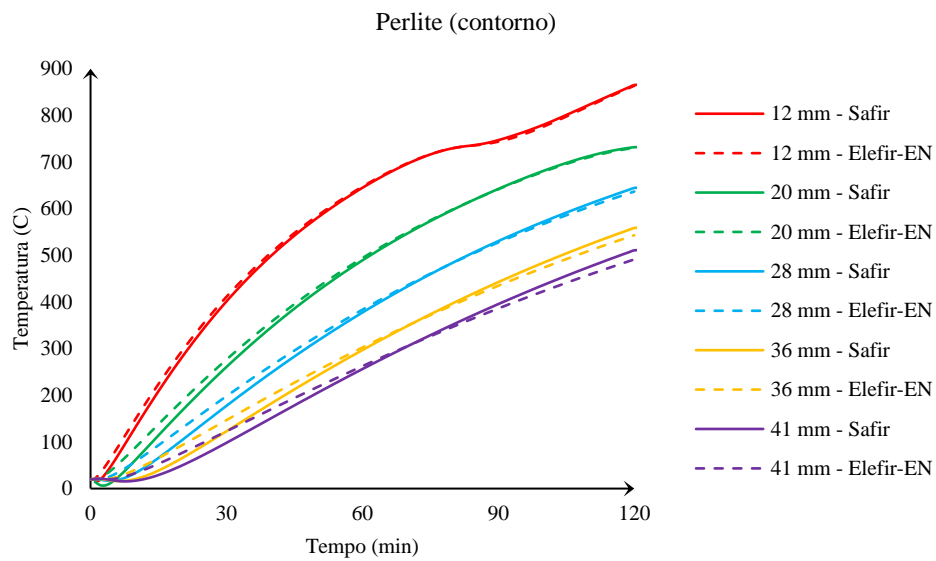


Figura 48 – Perlite, curva ISO 834.

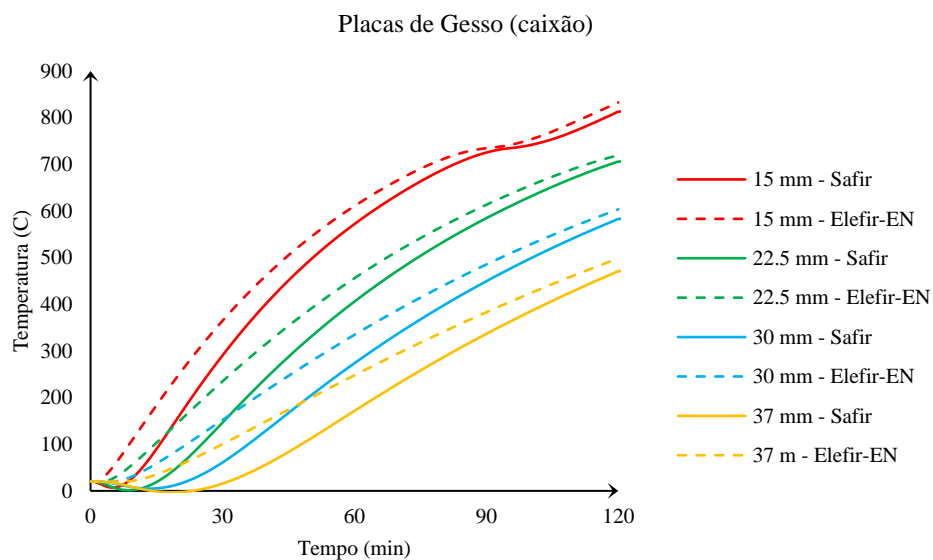


Figura 49 – Placas de gesso, curva ISO 834.

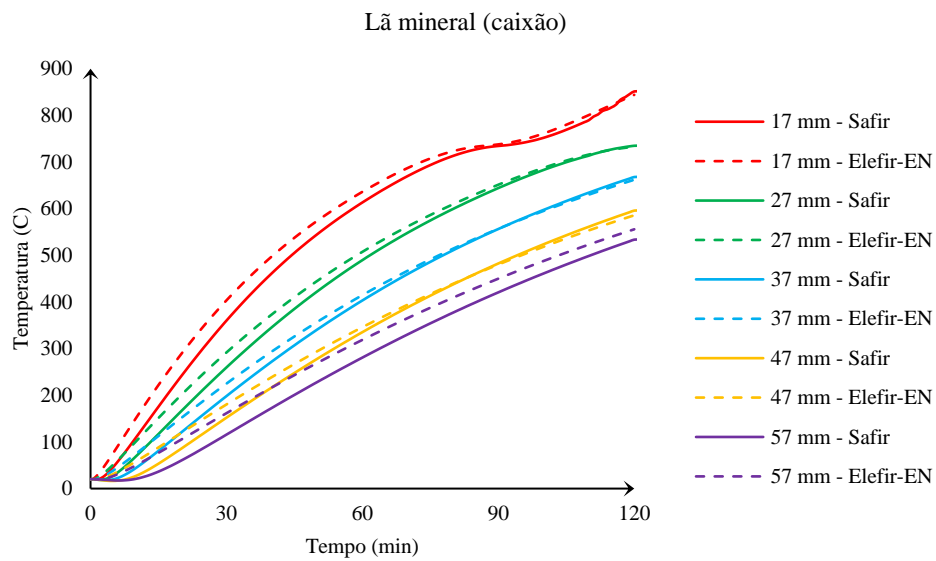


Figura 50 – Lã mineral, curva ISO 834.

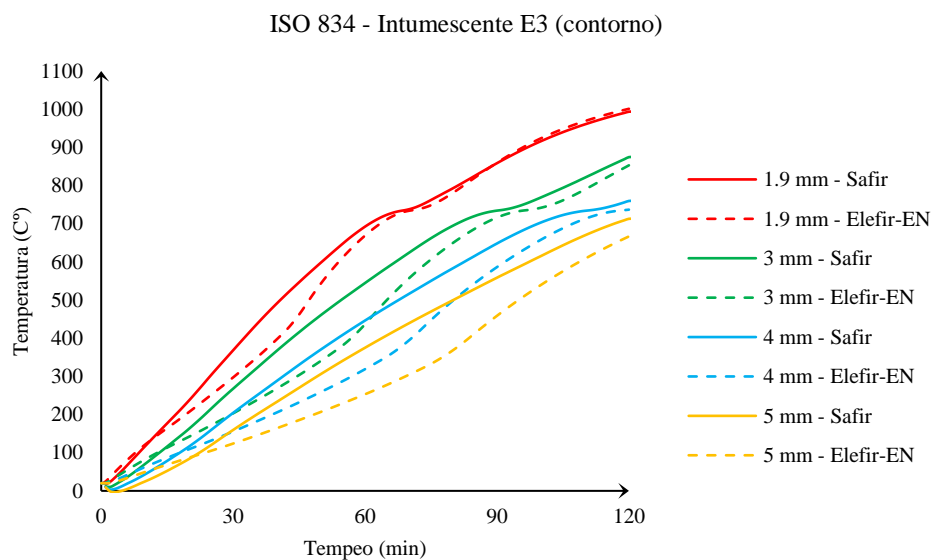


Figura 51 – Intumescente E3, curva ISO 834.

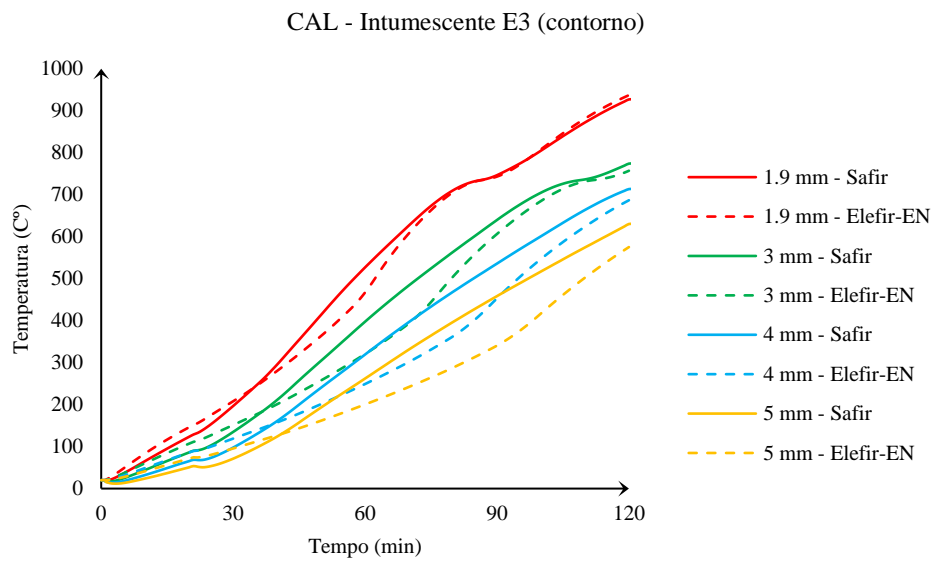


Figura 52 – Intumescente E3, curva de aquecimento lento “CAL”.

- IPE 500**

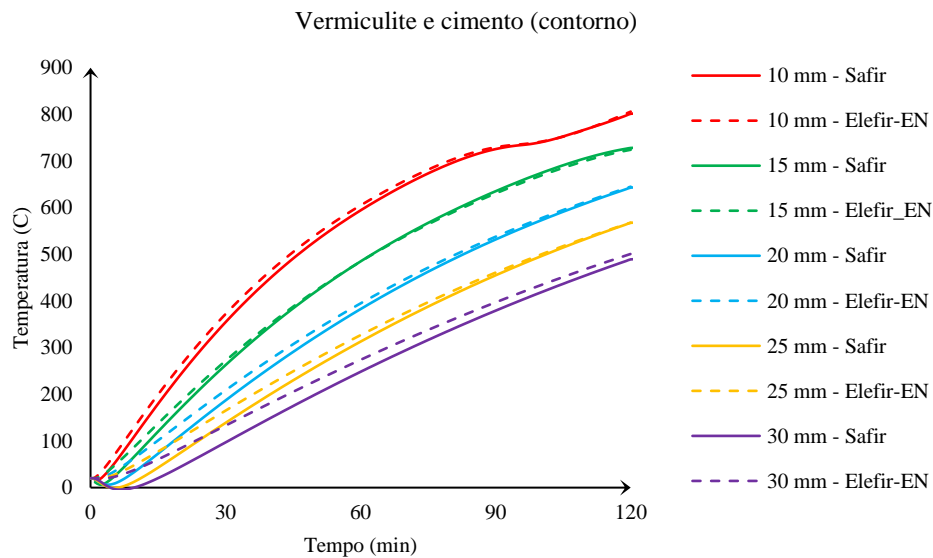


Figura 53 – Vermiculite e cimento, curva ISO 834.

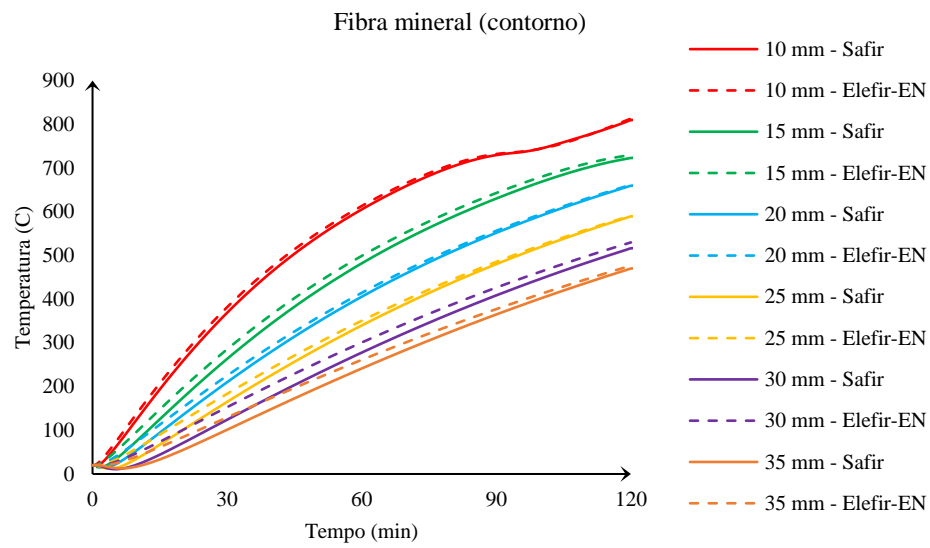


Figura 54 – Fibra mineral, curva ISO 834.

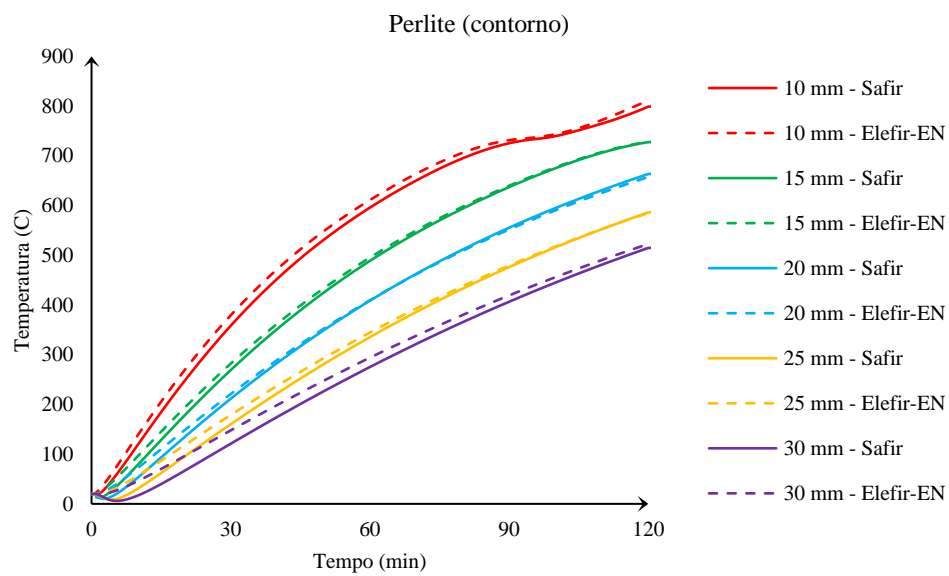


Figura 55 – Perlite, curva ISO 834.

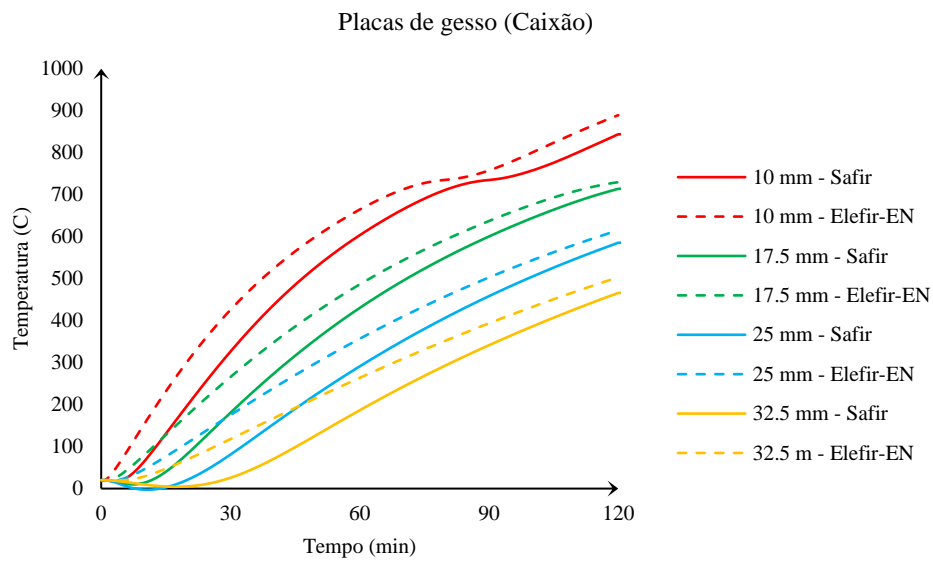


Figura 56 – Placas de gesso, curva ISO 834.

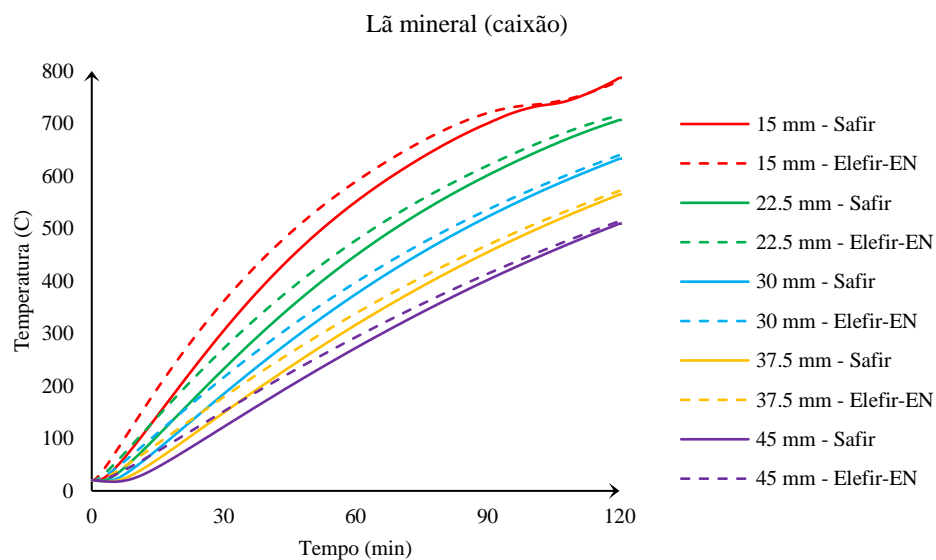


Figura 57 – Lã mineral, curva ISO 834.

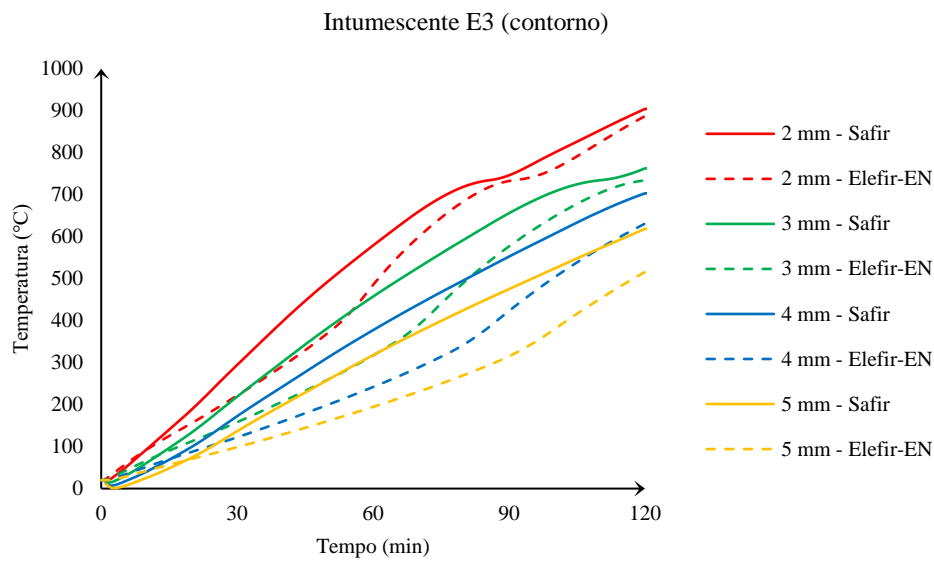


Figura 58 – Intumescente E3, curva ISO 834.

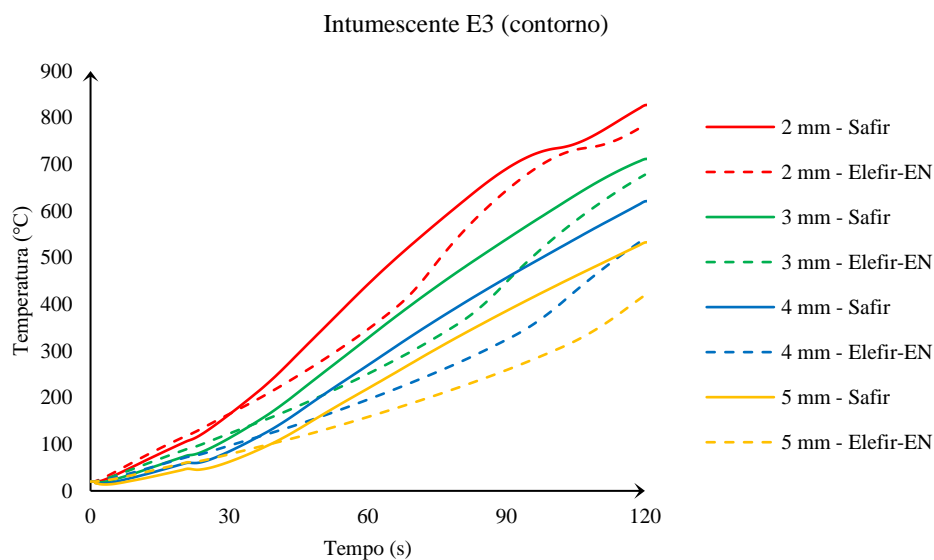


Figura 59 – Intumescente E3, curval de aquecimento lento “CAL”.

Comparando as duas análises verifica-se uma grande proximidade de resultados nas duas secções em estudo, o que assegura a veracidade e precisão de ambas as metodologias de análise consideradas neste ponto.

Observando os resultados obtidos, verifica-se uma pequena diferença respetivamente aos materiais de proteção utilizados sob a forma de caixão. É possível relacionar esta

diferença com as definições dos espaços vazios entre o material de proteção e o aço, podendo estes, ser definidos de maneira distinta no Elefir-EN e no SAFIR.

Sendo o Elefir-EN uma metodologia de análise mais conservadora “pelo lado da segurança” contrariamente ao programa de elementos finitos SAFIR, em que este tende a apresentar valores bastantes próximos da realidade, verifica-se que nos resultados obtidos de ambas as análises estão de acordo com esta particularidade referida sendo, na maioria dos materiais, os valores de temperatura mais elevados no Elefir-EN do que no SAFIR.

3.7. Conclusões

Neste capítulo apresentou-se um estudo onde se pretendeu relacionar e comparar três métodos de análise térmica distintos: análise simplificada por ábacos, análise simplificada através do programa Elefir-EN e análise numérica por um programa de elementos finitos, o SAFIR.

Numa primeira fase resumiu-se os materiais de proteção passiva ao fogo suscetíveis a análise, considerando as suas características e métodos de aplicação mais usuais.

Foram introduzidas ainda as bases teóricas importantes para a realização de uma análise térmica e foram apresentadas as propriedades térmicas inerentes a cada material de proteção e ao aço, das curvas de incêndio consideradas no estudo e explicação das metodologias de análise realizadas.

Por último, foram apresentados os resultados obtidos nas análises realizadas através de gráficos que relacionaram a espessura de proteção (d_p) com a temperatura crítica (θ_{cr}) e a temperatura crítica (θ_{cr}) com o tempo (s).

Os resultados obtidos mostraram as particularidades específicas de cada análise e a concordância já esperada entre análises.

Capítulo 4

Considerações finais

Considerações finais

4.1 Conclusões

4.2 Futuros desenvolvimentos

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

4.1. Conclusões

Neste trabalho pretendeu-se expor todo o trabalho desenvolvido durante o período de estágio curricular e no estudo complementar realizada em paralelo com o anterior.

Os objetivos do mesmo focaram-se em desenvolver trabalho relacionado com a área da construção metálica, procurando oferecer uma visão prática e de investigação da mesma.

Respetivamente ao estágio, este abrangeu com maior incidência a preparação de fabrico de uma fachada modelar em alumínio de uma obra de grandes dimensões, em que se acompanhou as fases e etapas constituintes da mesma. Dentro deste ponto, foram ainda apresentados os conceitos teóricos suplementares que compõem e abrangentes de todos os sistemas de alumínios, procurando oferecer um enquadramento teóricos relacionado com os temas abordados durante o período de estagio.

Os objetivos da realização incidiram sobre a integração nos processos de uma obra, introdução no mercado de trabalho e realização de trabalho no âmbito da construção metálica.

Cumpridos os objetivos proposto, a realização do estágio foi, a título pessoal, uma excelente escolha e uma oportunidade bastante gratificante de desenvolver trabalho no ramo das estruturas metálicas. Todas as tarefas propostas e os conteúdos assimilados contribuíram para o crescimento como profissional e tornaram-se numa estável e sólida base para a minha formação como engenheiro. Para os pontos referidos anteriormente, foram também importantes as relações profissionais e pessoais que se criaram, sustentadas por um ambiente de grande companheirismo e experiência.

A segunda parte deste trabalho teve como objetivo realizar uma análise comparativa de três metodologias de análise térmica distintas a materiais de proteção passiva ao fogo de estruturas metálicas.

Resumiram-se os materiais de proteção consoante as suas características e metodologias de aplicação assim como, as propriedades térmicas inerentes a cada um.

A primeira abordagem consistiu em comparar duas análises simplificada, “Ábacos vs. Elefir-EN”. Pretendeu-se com esta comparação verificar os resultados obtidos de duas análises provenientes das bases de cálculo da EN 1993-1-2. Observou-se uma concordância entre análises bastante satisfatória, com exceção de casos pontuais onde se verificou que quando o material sofria a simplificação de material pesado para leve, de modo a ser possível a utilização dos ábacos, esta originava um ligeiro aumento de espessura de proteção.

A segunda comparação de análises realizada consistiu em comparar a análise simplificada do Elefir-EN com a análise numérica através do programa de elementos finitos SAFIR. Esta abordagem originou mais uma vez resultados bastantes próximos, observando-se apenas ligeiras diferenças na utilização da proteção sob a forma de caixão. Concluiu-se que a causa principal desta discrepância esteja relacionada com a diferente maneira como ambos os programas identificam os espaços vazios entre o material de proteção e o aço.

Em ambas as comparações efetuadas foi possível observar que o intumescente utilizado, devido ao facto de ser retirado de um artigo sem valores das propriedades térmicas exatas, originou valores de proteção um pouco excessivos para temperaturas elevadas e um comportamento um pouco incomum, no que diz respeito ao aumento de temperatura no aço no tempo.

Este estudo conseguiu oferecer resultados consistentes e muito satisfatórios no que diz respeito à proximidade dos resultados das análises. Com o objetivo principal do estudo alcançado, a realização do mesmo mostrou ser uma componente de extrema importância na componente académica/investigação que este trabalho procurava oferecer.

4.2.Futuros desenvolvimentos

Concluindo o trabalho proposto e efetuando uma reflexão sobre o mesmo, surgem alguns pontos que merecem maior atenção e análise.

De forma a ligar o estágio e o estudo complementar, uma análise térmica a elementos de proteção de fachadas em alumínio utilizando as mesmas metodologias de análise que compuseram este trabalho seria algo relevante e com interesse prático.

Respetivamente à comparação de análises efetuada, a realização de ensaios experimentais de perfis revestidos com materiais de proteção passiva ao fogo seria algo

importante para, por um lado, confirmar os resultados obtidos pelos programas e bases de cálculo e por outro, analisar de forma mais aprofundada e precisa a evolução da condutividade térmica dos materiais de proteção e de que forma esta varia com o aumento da temperatura.

É recomendado também uma análise das bases de cálculo para as proteções em forma de caixão, especificamente, a formulação dos espaços vazios nos programas de cálculo.

Referências bibliográficas

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amaral, C. P. C. (2008). *Análise numérica do comportamento de madres enformadas a frio*. Universidade de Aveiro.
- Caixifacil. (2017). Janela de alumínio com corte térmico o que é? Retrieved from <http://www.caixifacil.com/o-que-e-uma-janela-de-aluminio-com-corte-termico/>
- Caixiterm. (2018). Corte térmico. Retrieved from <http://caixiterm.com/project-category/com-corte-termico-sistemas-de-abrir/>
- Carvalho, C. M. (2008). *Simulação do comportamento térmico de edifícios com fachadas ventiladas*. Universidade de Aveiro.
- CEN. Eurocódigo 1 - Ações em estruturas - Parte 1-2: Ações gerais - Ações em estruturas expostas ao fogo: NP EN 1991-1-2 (2010).
- CEN. Eurocódigo 3 - Projecto de estruturas de aço - Parte 1-2: Regras gerais - Verificação da resistência ao fogo: NP EN 1993-1-2 (2010).
- CEN. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members - Part 8: Applied reactive protection to steel members: EN 13381-8 (2010).
- CIMNE. (2018). What's GiD. Retrieved from <https://www.gidhome.com/whats-gid/>
- Construlink. (2006). Dossier técnico-económico - Fachada ventilada. Retrieved from <https://engenhariacivil.files.wordpress.com/2008/01/dossiereconomico.pdf>
- Extrusal. (2011). Anodização. Retrieved from <http://www.extrusal.pt/index.php?id=90>
- Franssen, J.-M., & Gernay, T. (2017). Modelling structures in fire with SAFIR®: theoretical background and capabilities. *Journal of Structural Fire Engineering*.
- Isover. (2017). Lã de vidro IBR. Retrieved December 11, 2017, from <http://www.placonorte.com/ladevidro.php>
- Knight, W. (2017). Exfoliated Vermiculite Fire-proofing. Retrieved December 10, 2017, from <http://www.vermiculite.co.in/fire-production.php>
- Lopes, N. (2018). Métodos avançados de cálculo. *Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista*.

- Mesquita, L. M. R., Piloto, P. A. G., Vaz, M. A. P., & Vila Real, P. (2005). *Comportamento de vigas em aço protegidas com tinta intumescente. V congresso de construção metálica e mista.*
- Mesquita, L. M. R., Piloto, P. A. G., Vaz, M. A. P., & Vila Real, P. (2006). *Ensaaios de resistência ao fogo de vigas em aço protegidas com tinta intumescente.*
- Navarra. (2018). Sistema de Fachadas. Retrieved November 26, 2018, from <http://www.navarraaluminio.com/pt/produtos/sistemas-de-fachadas/fachada-vec.html>
- Pannoni, F. D. (2017). Proteção de Estruturas Metálicas Frente ao Fogo. Retrieved December 10, 2017, from <http://wwwo.metallica.com.br/protecao-de-estruturas-metalicas-frente-ao-fogo>
- Pereira, A. A. (2009). *Estudo Experimental e Simulação numérica do Comportamento de Tintas Intumescentes na Protecção de Elementos Estruturais em Condições de Incêndio.* Instituto Politécnico de Bragança.
- Pinto, T. M. C. G. (2008). *Estudo de tintas intumescentes na protecção de elementos estruturais em condições de incêndio.* Instituto Politécnico de Bragança.
- Risca, F. e. (2012). Muro Invertido Trama Horizontal. Retrieved from <http://www.ferreirarisca.com/novo/index.php/pt/produtos/fachadas/muro-invertido-trama-horizontal>
- SteelConstruction.info. (2014). Fire protecting structural steelwork. Retrieved November 27, 2017, from https://www.steelconstruction.info/Fire_protecting_structural_steelwork
- Termolan. (2016). Protecção Passiva ao Fogo. Retrieved December 11, 2017, from <http://termolan.pt/solucoes/proteccao-passiva-ao-fogo/>
- Vila Real, P. (2003). *Incêndio em Estruturas Metálicas - Cálculo Estrutural.* (E. Orion, Ed.).
- Vila Real, P. (2016). Proteção passiva de estruturas metálicas em situação de incêndio – a importância do conhecimento da temperatura crítica. In *Proteger 2016 - 5ª Conferência de Segurança* (p. 50).
- Vila Real, P., & Franssen, J.-M. (2010). Elefir-EN – A software for fire design of structural steel members. Retrieved from <http://elefired.web.ua.pt>

WikiEngenharia. (2018). Laminagem. Retrieved November 25, 2018, from <http://wiki.ued.ipleiria.pt/wikiEngenharia/index.php/Laminagem>

WikiMartifer. (2018a). *Formação Sistemas Alumínio*.

WikiMartifer. (2018b). *Materiais*.

WikiMartifer. (2018c). *Sistemas de Alumínio*.

